

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевые транзисторы — это усилительные и переключательные полупроводниковые приборы, ток в которых управляется электрическим полем и обусловлен дрейфовым движением основных носителей. В зависимости от способа управления различают полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом и с управляющим переходом металл-полупроводник (барьером Шоттки), а также полевые транзисторы с изолированным затвором.

Полевые транзисторы имеют как минимум три вывода во внешнюю цепь: исток, затвор и сток. В некоторых вариантах имеется и четвертый вывод — подложка. Кроме того, в каждом транзисторе имеется проводящий канал. Смысл этих терминов следующий:

Канал — область полупроводникового кристалла p - или n -типа, через которую проходит ток основных носителей.

Исток — полупроводниковая область, из которой основные носители вводятся в канал.

Сток — полупроводниковая область, через которую основные носители выводятся из канала.

Затвор — электрод, на который подается напряжение, управляющее величиной тока, проходящего через канал, или, иначе говоря, управляющее электрическим сопротивлением канала. Материалом затвора может служить как полупроводник, так и металл.

Подложка — кристалл полупроводника p - или n -типа, на котором сформирован полевой транзистор.

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С УПРАВЛЯЮЩИМ ПЕРЕХОДОМ

В транзисторах такого типа ток основных носителей через канал управляется p - n -переходом или выпрямляющим переходом металл-полупроводник, смещенным в обратном направлении. Изменение напряжения на затворе сдвигает границу области обеднения управляющего перехода, что вызывает изменение поперечного сечения проводящего канала и, следовательно, его сопротивления. Это означает,

что полевой транзистор с управляющим переходом можно рассматривать как переменный резистор, управляемый напряжением.

Один из вариантов устройства полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа показан на рис. 1.

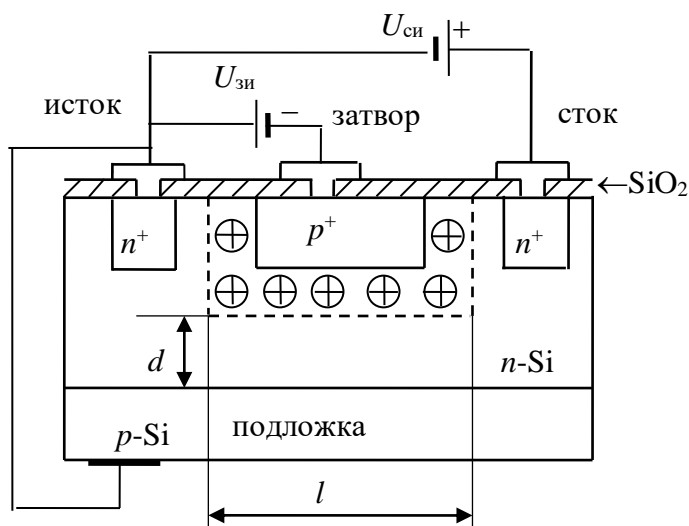


Рис. 1. Упрощенное устройство планарного полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа. Показано подключение к источникам питания в схеме с общим истоком. l – длина проводящего канала n -типа, d – его ширина.

На кристалле-подложке кремния p -типа выращивается слой n -кремния, в котором формируются две n^+ -области для контактов с истоком и стоком, а также p^+ -область затвора. Готовая структура покрывается защитным слоем диоксида кремния, в котором предусматриваются «окна» для выводов во внешнюю цепь. В реальных конструкциях транзистора p^+ , n^+ -области и граница управляющего перехода не имеют острых углов.

Полярности напряжений затвор-исток ($U_{зи}$) и сток-исток ($U_{си}$) определяются типом проводимости канала. Напряжение $U_{зи}$ смещает управляющий переход между затвором и каналом в обратном направлении; напряжение $U_{си}$ обеспечивает дрейф основных носителей канала от истока к стоку. Очевидно, что в случае канала n -типа (рис. 1)

потенциал затвора относительно истока должен быть отрицательным, а потенциал стока – положительным. Для транзистора с каналом p -типа полярности напряжений будут противоположными.

$P^+ - n$ -переход между затвором и каналом – односторонний, поэтому его ширина, как известно, определяется главным образом размерами области обеднения в n -полупроводнике, где сосредоточены некомпенсированные положительные заряды ионов доноров. Ширина канала d – расстояние по вертикали от границы области обеднения до нижней кромки канала, т. е. до границы с p -подложкой.

Графические символы полевых транзисторов с управляющим переходом показаны на рис. 2. В случае если транзисторы являются элементами интегральных схем (бескорпусный вариант), то, как и для любых других типов транзисторов (полевые, биполярные), кружок на изображении отсутствует. Транзисторы такого типа имеют три внешних вывода, так как подложка обычно соединяется с истоком (см. рис.1).

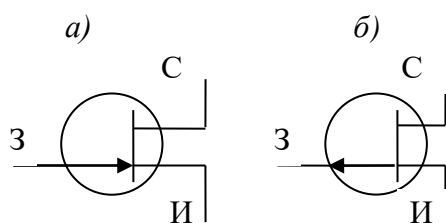


Рис. 2. Схемные изображения полевых транзисторов с управляющим переходом; а – с каналом n -типа, б – с каналом p -типа. И – вывод истока, З – вывод затвора, С – вывод стока

В дальнейшем, если это особо не оговорено, речь пойдет о полевом транзисторе с каналом n -типа.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ С УПРАВЛЯЮЩИМ ПЕРЕХОДОМ И СТАТИЧЕСКИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Принцип действия таких транзисторов и вид их вольтамперных характеристик становятся понятными, если последовательно рассмотреть два случая.

1. Поддерживая постоянным малое напряжение между стоком и истоком $U_{си}$, достаточное для поддержания дрейфа основных носителей

через канал, будем увеличивать напряжение на затворе $U_{зи}$. Так как подложка соединена с истоком, то напряжение $U_{зи}$ оказывается приложенным между затвором и каналом, и его увеличение будет смещать управляющий переход в обратном направлении.

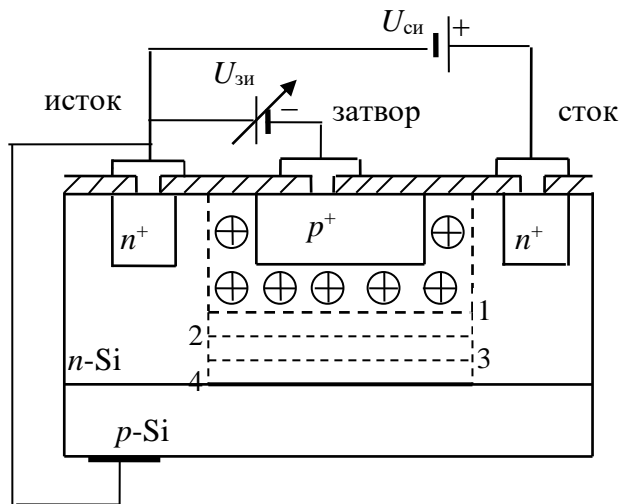


Рис. 3. Изменение положения верхней границы канала при расширении управляющего перехода. 1 – $U_{зи} = 0$. 2, 3 – положения границы, соответствующие возрастающим значениям напряжения на затворе. Граница 4 соответствует напряжению отсечки $|U_{зи}| = U_{отс}$

При $U_{зи} = 0$ ширина канала – наибольшая. Увеличение обратного смещения управляющего $p^+ - n$ -перехода вызывает смещение вниз границы области обеднения, и поперечное сечение канала уменьшается (линии 2 и 3 на рис. 3). Ток стока при этом также уменьшается, так как при постоянном напряжении $U_{си}$ растет сопротивление канала.

Дальнейшее увеличение напряжения на затворе приводит к полному перекрытию канала (линия 4 на рис. 3). Абсолютная величина напряжения на затворе, при котором ток стока становится равным нулю, называется напряжением отсечки $U_{отс}$ полевого транзистора с управляющим переходом.

Напряжение между истоком и стоком $U_{си}$ в этом случае выбирается небольшим для того, чтобы неодинаковость потенциалов различных точек канала при протекании тока не искажала простую картину влияния напряжения на затворе на величину тока. Это

позволило считать, что область обеднения управляющего перехода смещается вниз параллельно нижней границе канала.

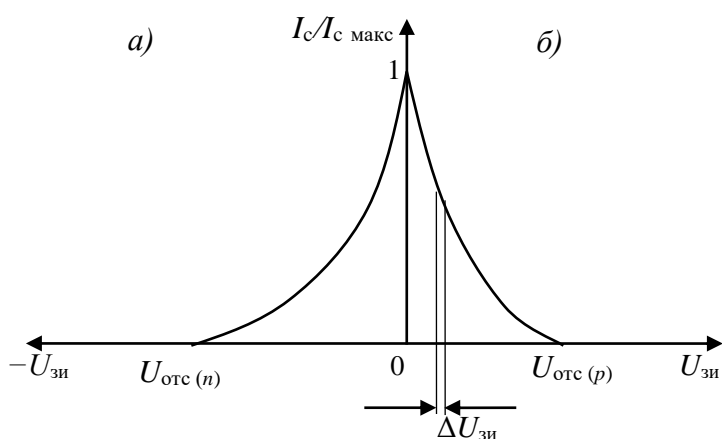


Рис. 4. Передаточные характеристики полевого транзистора с управляющим переходом: а) с каналом n -типа, б) с каналом p -типа

Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при постоянном значении $U_{си}$ называется передаточной характеристикой полевого транзистора. Эта характеристика для полевого транзистора с управляющим переходом показана на рис. 4. В соответствии с рассмотренным выше физическим механизмом управления ток стока наибольший при $U_{зи} = 0$, и монотонно уменьшается вплоть до нуля при увеличении модуля управляющего напряжения на затворе до значения $|U_{зи}| = U_{отс}$.

2. Поддерживая постоянным напряжение между затвором и истоком $U_{зи}$, будем увеличивать величину напряжения сток-исток. При протекании тока через канал его потенциал повышается по мере приближения к стоку. Это влечет за собой увеличение обратного смещения управляющего перехода и, соответственно, уменьшение поперечного сечения канала в направлении стока.

Величина напряжения, смещающего управляющий переход в обратном направлении, у истока равна $|U_{зи}|$, а у стока $|U_{зи}| + U_{си}$. Это приводит к тому, что ширина канала будет наибольшей у истока и наименьшей у стокового конца канала (рис. 5, линия 2).

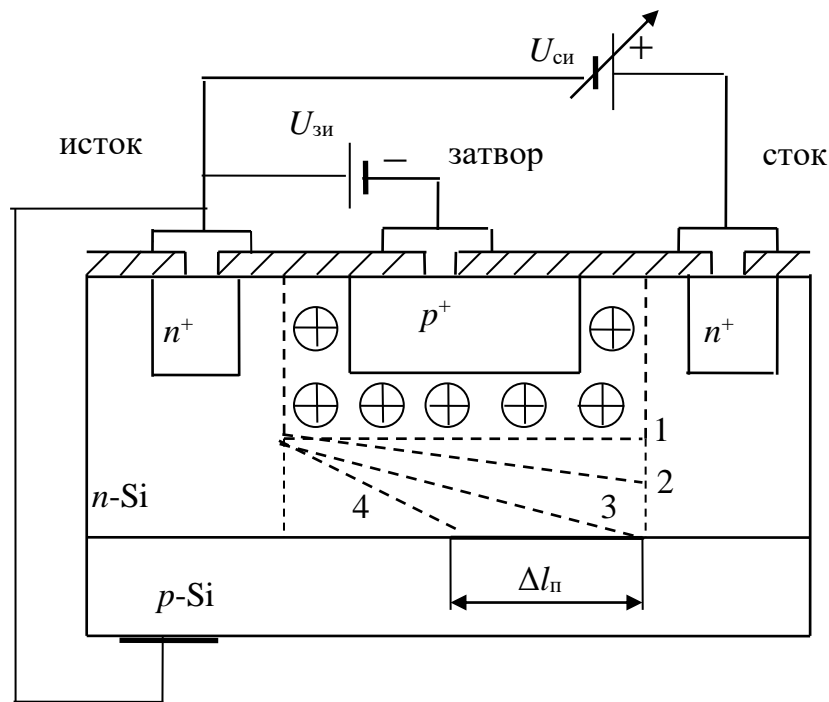


Рис. 5. Изменение ширины канала при увеличении напряжения сток-исток ($U_{зи} = \text{const}$). Линии 1–4 показывают последовательность изменения положения верхней границы проводящего канала

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ разность потенциалов, смещающая управляющий переход в обратном направлении, у стокового конца станет равной напряжению отсечки полевого транзистора:

$$|U_{зи}| + U_{си} = U_{отс}. \quad (1),$$

и нижняя граница управляющего перехода коснется дна канала только в одной точке, у стокового конца (линия 3 на рис. 5). Соответствующее напряжение сток-исток называется напряжением насыщения:

$$U_{си \text{ нас}} = U_{отс} - |U_{зи}| \quad (2)$$

В отличие от случая, когда напряжение сток-исток поддерживается постоянным, совпадение границы управляющего перехода и дна канала не приводит к прекращению тока стока. Если бы это произошло, потенциалы различных точек канала стали бы одинаковыми, и исчезла бы причина, вызывающая увеличение обратного смещения перехода в направлении от истока к стоку. Если ток стока при напряжении насыщения $U_{си \text{ нас}}$ уменьшится, то потенциал

канала в точке перекрытия станет менее положительным, перекрытие в точке исчезнет, и ток стока увеличится до прежнего значения.

При дальнейшем увеличении $U_{си}$ канал «перекрывается» на длине $\Delta l_{п}$ тем большей, чем выше напряжение сток-исток. В результате автоматически поддерживается очень малое сечение проводящего канала, и величина тока стока ограничивается.

Ограничение тока стока происходит по двум причинам. Во-первых, при увеличении напряжения сток-исток происходит удлинение «перекрытой» части канала, и, следовательно, увеличение ее сопротивления. Соответственно, из закона Ома для участка цепи следует, что ток стока либо останется постоянным (при пропорциональном изменении сопротивления канала R с напряжением), либо будет слабо возрастать.

Например, если учесть, что ширина обратного смещенного резкого $p-n$ -перехода пропорциональна $\sqrt{U_{обр}}$, т. е. в нашем случае $\sqrt{|U_{зи}| + U_{си}}$, а также то, что изменение длины перекрытой части канала $\Delta l_{п}$ пропорционально изменению ширины управляющего перехода, можно записать:

$$I_c = \frac{U_{си}}{R} \cdot \frac{U_{си}}{\Delta l_{п}} \cdot \frac{U_{си}}{\sqrt{|U_{зи}| + U_{си}}} \cdot \sqrt{U_{си}} \quad (3)$$

Видно, что в этом случае ток стока будет слабо возрастать с напряжением $U_{си}$. Этот фактор является определяющим для относительно длинных каналов (~ 50 мкм).

Во-вторых, при достижении относительно высокой напряженности электрического поля в канале (более 10^3 В/см) начинает уменьшаться подвижность основных носителей. Причина этого явления в том, что при таких полях дрейфовая скорость подвижных носителей достигает величин того же порядка, что и средняя тепловая скорость. При дальнейшем возрастании напряженности поля увеличивается число столкновений носителей с атомами кристаллической решетки, что приводит к замедлению нарастания дрейфовой скорости и, соответственно, к уменьшению их подвижности. Это явление наблюдается в полевых транзисторах с управляющим переходом

металл-полупроводник с длиной канала 1–10 мкм и служит причиной наличия пологого возрастающего участка на выходной вольт-амперной характеристике при $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$.

Форма статических выходных вольтамперных характеристик полевого транзистора с управляющим переходом (рис. 6) целиком определяется описанными выше процессами изменения конфигурации проводящего канала.

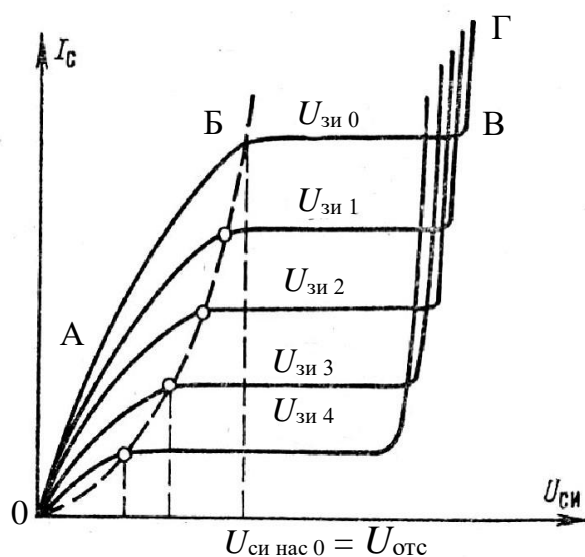


Рис. 6. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим переходом. $U_{зи 0} = 0$ В; $|U_{зи 1}| < |U_{зи 2}| < |U_{зи 3}| < |U_{зи 4}|$

На начальном участке 0-А (при малых напряжениях $U_{си}$) ток стока растет почти линейно, так как форма канала искажается очень слабо. На следующем участке А-Б нарастание тока стока замедляется из-за уменьшения сечения канала и роста его сопротивления. Точки на характеристиках, в которых происходит переход к пологим участкам кривых, соответствуют напряжениям сток-исток, равным напряжению насыщения, которое тем меньше, чем больше напряжение $U_{зи}$ (2). В частности, в точке Б на характеристике при нулевом напряжении на затворе $U_{си\text{ нас}} = U_{отс}$. Геометрическое место точек выхода характеристик на пологий участок показано штриховой линией на рис. 6.

Пологий участок Б-В является рабочей областью характеристик и обусловлен увеличением сопротивления канала за счет удлинения «перекрытой» части Δl_p . При дальнейшем увеличении напряжения сток-исток возникает лавинный пробой управляющего перехода у стокового

конца канала, и ток стока резко возрастает (участок В-Г, находящийся за областью предельно допустимых значений $U_{си}$).

Принцип действия полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом и переходом металл-полупроводник одинаковы. Как правило, транзисторы с управляющим барьером Шоттки изготавливаются на основе арсенида галлия. Известно, что подвижность носителей в GaAs почти на порядок больше, чем в кремнии, поэтому при одинаковых геометрических параметрах конструкции ток стока и, соответственно, крутизна передаточной характеристики транзистора с управляющим переходом металл-полупроводник значительно выше.

СТАТИЧЕСКИЕ И МАЛОСИГНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Статические параметры.

К статическим параметрам относятся предельно-допустимые значения напряжений и токов, обеспечивающие безотказную работу транзисторов в электронных схемах, а также напряжение отсечки полевого транзистора $U_{отс}$. Величина $U_{отс}$ зависит от концентрации примесей в материале канала и от его начальной ширины («просвета», т.е. расстояния между линиями 1 и 4 на рис. 3).

Известно [1], что при увеличении концентрации примеси либо в одной области, либо в обеих смежных областях $p-n$ -перехода его ширина уменьшается. Соответственно, чем больше концентрации примесей в материале канала, тем меньше будет проникать в него управляющий переход, и для перекрытия канала потребуется более высокое напряжение отсечки. Точно такая же зависимость напряжения отсечки наблюдается и от начальной ширины канала: с увеличением его поперечного сечения также растет $U_{отс}$ из-за необходимости прикладывать для перекрытия канала более высокое обратное напряжение на управляющий переход.

Рабочей областью выходных характеристик является их пологий участок (Б-В на рис. 6); положение точки Б (напряжение насыщения)

определяется величиной напряжения отсечки и напряжением затвористок. Из этого следует, что для увеличения протяженности полого участка напряжение насыщения, и, следовательно, напряжение отсечки должны быть малыми величинами. Это достигается тем, что концентрация примесей в канале выбирается невысокой ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Параметры малого сигнала.

Любой транзистор как усилитель переменного сигнала не должен вносить нелинейные искажения, т. е. его передаточная характеристика должна быть линейной. Как видно из рис. 4, ее можно считать условно линейной, только если на вход транзистора подавать переменное напряжение $\Delta U_{зи}$ очень малой амплитуды. Соответственно, усилительные свойства транзистора определяются параметрами малого сигнала.

Для введения этих параметров транзистор представляют в виде линейного четырехполюсника; переменными величинами в уравнениях являются входные и выходные токи и напряжения малой амплитуды. Так как полевые транзисторы, в отличие от биполярных, – это приборы, управляемые напряжением, то для линейного четырехполюсника (рис. 7) из всех возможных систем уравнений выбираются те, которые описывают зависимости входного и выходного токов от входного и выходного напряжения:

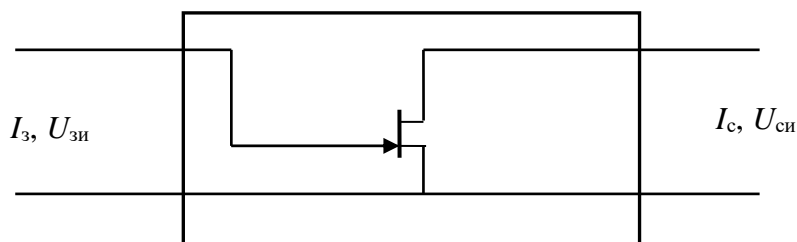


Рис. 7. Полевой транзистор как линейный четырехполюсник

Малые приращения (дифференциалы) входного и выходного токов линейного четырехполюсника в данном случае:

$$dI_з = Y_{11}dU_{зи} + Y_{12}dU_{си};$$

$$dI_с = Y_{21}dU_{зи} + Y_{22}dU_{си}$$

Эти уравнения соответствуют системе Y-параметров.

Строго говоря, все малые приращения в этих формулах являются комплексными величинами. Однако, при относительно невысоких частотах ($\leq 10^7$ Гц) их можно считать действительными величинами, и комплексные Y-параметры становятся также действительными. В этом случае система Y-параметров заменяется системой g-параметров:

$$\begin{aligned} dI_3 &= g_{11}dU_{зи} + g_{12}dU_{си}; \\ dI_c &= g_{21}dU_{зи} + g_{22}dU_{си} \end{aligned}$$

Тогда, при коротком замыкании по переменному току на выходе ($dU_{си} = 0$):

$$dI_3 = g_{11}dU_{зи}; \quad dI_c = g_{21}dU_{зи}$$

Отсюда имеем:

$$g_{11} = \frac{dI_3}{dU_{зи}} \text{ — входная дифференциальная проводимость};$$

$$g_{21} = \frac{dI_c}{dU_{зи}} = S \text{ — крутизна характеристики прямой передачи}$$

(крутизна передаточной характеристики, рис. 4). Этот параметр имеет также формальное название: дифференциальная проводимость прямой передачи.

При коротком замыкании по переменному току на входе ($dU_{зи} = 0$):

$$dI_3 = g_{12}dU_{си}; \quad dI_c = g_{22}dU_{си}$$

Соответственно:

$$g_{12} = \frac{dI_3}{dU_{си}} \text{ — дифференциальная проводимость обратной передачи};$$

$$g_{22} = \frac{dI_c}{dU_{си}} = \frac{1}{r_{д\text{ вых}}} \text{ — выходная дифференциальная проводимость};$$

($r_{д\text{ вых}}$ — выходное дифференциальное сопротивление).

Входная дифференциальная проводимость g_{11} — очень малая величина. Соответствующие значения входного сопротивления для транзисторов с управляющим переходом $\sim 10^9\text{--}10^{10}$ Ом. Это свойство полевых транзисторов очень важно при усилении малых токов, которые могут создать на высоком входном сопротивлении усилительного каскада заметное падение напряжения.

Параметр g_{12} , характеризующий внутреннюю обратную связь между выходной и входной цепями, не играет существенной роли при относительно невысоких частотах.

Основными дифференциальными параметрами, применяемыми при расчете усилительных каскадов, являются крутизна S и выходная дифференциальная проводимость g_{22} или ее обратная величина – выходное дифференциальное сопротивление $r_{д\text{ вых}}$. Эту величину часто называют внутренним сопротивлением R_i .

Крутизна передаточной характеристики – важный параметр, характеризующий усилительные свойства: чем больше S , тем большее приращение выходного тока ΔI_c приходится на заданный малый интервал входного напряжения $\Delta U_{зи}$. При данном напряжении отсечки крутизна будет выше для тех транзисторов, у которых наблюдаются высокие значения тока стока при $U_{зи} = 0$. Плотность тока пропорциональна подвижности носителей μ : $J = en\mu\mathcal{E}$, поэтому крутизна будет тем больше, чем выше подвижность основных носителей в канале. С этой точки зрения предпочтительно использовать транзисторы с каналом n -типа, так как подвижность электронов значительно больше подвижности дырок. Обычные значения крутизны маломощных полевых транзисторов с управляющим переходом – единицы миллиампер на Вольт (мА/В).

Для определения относительного влияния напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$ на ток стока вводится параметр μ_{yc} – статический коэффициент усиления, соответствующий постоянному току стока:

$$\mu_{yc} = \frac{dU_{си}}{dU_{зи}},$$

где $dU_{си}$ и $dU_{зи}$ – абсолютные значения изменений напряжений $U_{си}$ и $U_{зи}$, при которых происходят одинаковые по величине, но разные по знаку изменения тока стока. Очевидно, что $\mu_{yc} = SR_i$. Видно, что параметр R_i также определяет усилительные свойства.

Величина R_i – порядка 10 – 100 кОм, значения коэффициента усиления μ_{yc} – несколько десятков.

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ (МДП-ТРАНЗИСТОРЫ)

В таких полевых транзисторах затвор электрически изолирован от канала тонким слоем диэлектрика (см. рис. 8.....). Материалом для затвора служит либо металл (Al), либо поликристаллический кремний с очень высокой концентрацией примеси; сам транзистор, как правило, также изготавливают из кремния.

Существуют два варианта конструкции транзистора. В полевом транзисторе с индуцированным каналом (рис. 8 , а) проводящий канал отсутствует; он создается за счет влияния электрического поля, создаваемого затвором (см. ниже). В транзисторе со встроенным каналом (рис. 8 ,б) канал существует изначально: либо за счет сформированной в процессе изготовления перемычки между областями истока и стока, либо за счет влияния поля заряда соответствующей полярности на изолирующем диэлектрике.

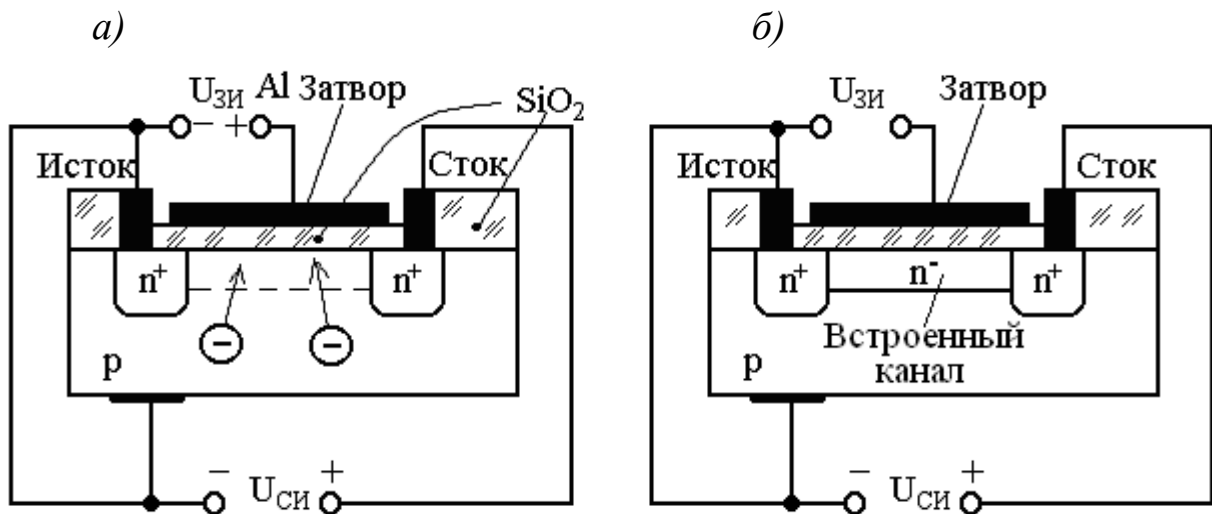
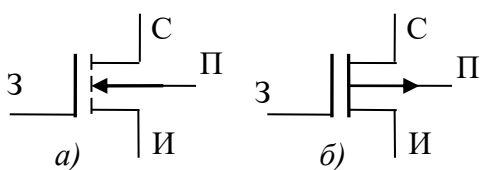


Рис. 8. Варианты конструкции полевого транзистора с изолированным затвором: а) с индуцированным каналом, б) со встроенным каналом.

Рис. 9 . Схемные изображения МДП-транзисторов: а) – с индуцированным *n*-каналом, б) – со встроенным *p*-каналом



Индукцированный канал (рис. 8 , а) возникает за счет воздействия электрического поля затвора, направленного перпендикулярно границе между диэлектриком и полупроводником. Физический механизм образования такого канала определяется процессами, протекающими в очень тонких приповерхностных слоях полупроводника. Рассмотрим их более подробно.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Поверхность кристалла, т. е. граница между кристаллом и окружающей средой, является самым большим его «дефектом». На этой границе происходит обрыв связей между атомами в перпендикулярном направлении, и вследствие этого электронная структура приповерхностного слоя отличается от таковой для объема. На энергетической диаграмме вблизи поверхности кристалла в запрещенной зоне появляются дискретные поверхностные энергетические уровни. Электроны, занимающие эти уровни, не могут проникать вглубь кристалла и локализуются вблизи поверхности. Поверхностные уровни могут служить донорами, акцепторами или ловушками. Заполнение акцепторных уровней означает локализацию электронов, освобождение донорных уровней — локализацию дырок, и в результате поверхность заряжается отрицательно или положительно.

В соответствии с условием электронейтральности это должно сопровождаться образованием вблизи поверхности полупроводника объемного заряда, нейтрализующего поверхностный заряд. Это происходит, прежде всего, за счет оттеснения вглубь кристалла зарядов того же знака (электронов, дырок). В результате приповерхностный слой полупроводника оказывается обедненным носителями заряда одного знака с поверхностным зарядом и обогащенным носителями заряда противоположного знака, и электрическое поле поверхностного заряда тем самым экранируется.

Если в металлах, имеющих очень высокую концентрацию электронов ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$), нейтрализация поверхностного заряда

происходит уже на глубине, равной нескольким параметрам кристаллической решетки, то в полупроводниках область объемного заряда простирается на глубину 10^{-4} см и более. Обычно ее принимают равной дебаевской длине (радиусу) экранирования L_D . Она определяется как расстояние, на протяжении которого напряженность электрического поля в веществе с подвижными носителями заряда уменьшается в e раз ($e \approx 2,72$). Расчеты показывают, что для собственного полупроводника

$$L_D = \left(\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{2e^2 n_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — электрическая постоянная вакуума, e — заряд электрона. Для примесного полупроводника с концентрацией донорной или акцепторной примеси N :

$$L_D = \left(\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{e^2 N} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.2)$$

Поскольку $N \gg n_i$, дебаевский радиус в примесных полупроводниках намного меньше, чем в собственных. Так, при $T = 300$ К в собственном полупроводнике (кремнии) $L_D \approx 14$ мкм, а в n -кремнии с концентрацией доноров 10^{16} см $^{-3}$ $L_D \approx 0,04$ мкм.

Переделать рисунок

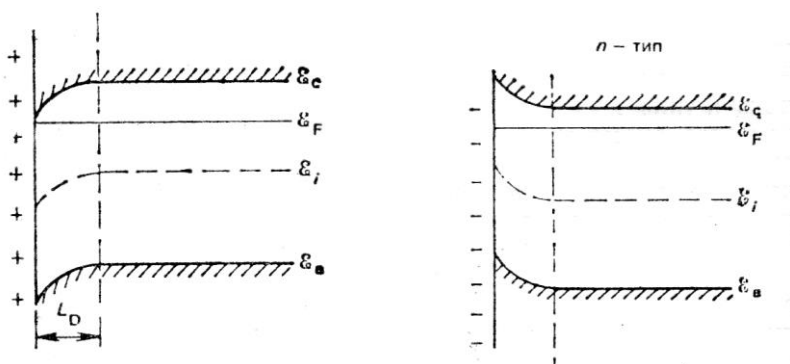


Рис. 10. Изгиб зон полупроводника n -типа при наличии положительного (а) и отрицательного (б) поверхностного заряда

Наличие на поверхности полупроводника электрического заряда обуславливает возникновение разности потенциалов между его поверхностью и объемом. Следствием этого является искривление энергетических зон.

Отрицательный поверхностный заряд вызывает изгиб зон вверх (рис. 10, б), так как при перемещении электрона из объема к поверхности его энергия увеличивается. Соответственно, положительный заряд на поверхности вызывает изгиб энергетических зон вниз (рис. 10, а).

ЭФФЕКТ ПОЛЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Аналогичная картина — обеднение или обогащение приповерхностного слоя полупроводника подвижными носителями заряда — наблюдается и под воздействием электрического поля, направленного перпендикулярно поверхности. Это явление называется эффектом поля. Состояние приповерхностного слоя определяется ориентацией и величиной вектора электрической напряженности.

Рассмотрим полупроводник p -типа, у которого отсутствует поверхностный заряд, т.е. на его энергетической диаграмме изначально нет изгиба зон у поверхности. Ясно (см. выше), что это предположение далеко от реальности. Тем не менее, примем его для того, чтобы явным образом наблюдалось влияние внешнего электрического поля. Вектор напряженности поля направлен перпендикулярно к поверхности, и поле проникает в полупроводник на глубину L_D (см. формулу (5.2)).

5.2.1. Режим обеднения

Если напряженность поля невелика и ее вектор направлен к поверхности полупроводника p -типа, (рис. 11, а), то основные носители (дырки) оттесняются вглубь кристалла и их концентрация у поверхности заметно уменьшается (рис. 11, б). При этом неосновные носители (электроны) притягиваются из объема кристалла к поверхности, но из-за небольшой напряженности поля (рис. 11, в) их концентрация у поверхности остается пренебрежимо малой. В результате возникает

слой толщиной $L_{об}$, обедненный основными носителями, в котором сосредоточены некомпенсированные отрицательные ионы акцепторов.

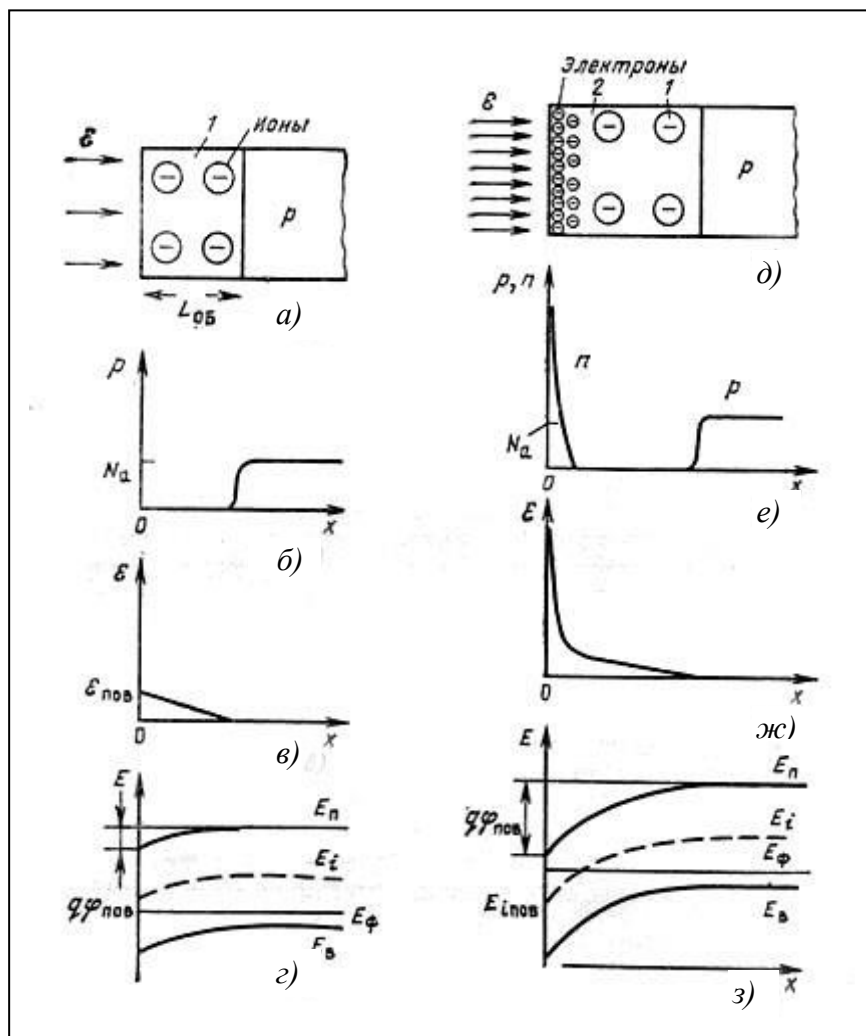


Рис. 11. Режим обеднения (а – г) и инверсии (д – з) приповерхностной области полупроводника p -типа при воздействии внешнего электрического поля, перпендикулярного к поверхности

На рис. 11, г показана энергетическая диаграмма обедненного слоя. Энергетические зоны кристалла у поверхности в пределах слоя толщиной $L_{об}$ изгибаются вниз, что соответствует увеличению энергии дырок и уменьшению энергии электронов. Уровень Ферми расположен ниже середины запрещенной зоны и остается постоянным, так как система находится в равновесии (ток через полупроводник отсутствует). Следовательно, тип проводимости полупроводника по всей толщине одинаков.

Видно, что расстояние между потолком валентной зоны и уровнем Ферми $E_F - E_V$ увеличивается, а расстояние от уровня Ферми до дна зоны проводимости $E_C - E_F$ уменьшается на одинаковую величину $e\phi_{\text{пов}}$. Соответственно, (см. формулы (2.7) и (2.8) *оранж. кн.*) это приводит к уменьшению поверхностной концентрации дырок и к увеличению поверхностной концентрации электронов:

$$p_{\text{пов}} = p_{p_0} e^{-\frac{e\phi_{\text{пов}}}{kT}}; \quad n_{\text{пов}} = n_{p_0} e^{\frac{e\phi_{\text{пов}}}{kT}}.$$

Режим обеднения будет сохраняться, пока поверхностная концентрация электронов не превысит поверхностную концентрацию дырок: $n_{\text{пов}} > p_{\text{пов}}$. Равенству этих концентраций соответствует пороговое значение поверхностного потенциала (с учетом, что $N_A = p_{p_0}; p_{p_0} \cdot n_{p_0} = n_i^2$):

$$\phi_{\text{пор}} = \frac{kT}{2e} \ln \frac{p_{p_0}}{n_{p_0}} = \frac{kT}{2e} \ln \frac{N_A p_{p_0}}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{n_i}.$$

Окончательно,

$$\phi_{\text{пор}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{n_i}. \quad (5.3)$$

5.2.2. Режим инверсии

При дальнейшем увеличении напряженности поля поверхностный потенциал становится больше порогового, и в приповерхностном слое возникает режим инверсии типа проводимости (рис. 11, *д – з*). В этом режиме поверхностная концентрация неосновных носителей (в нашем случае электронов) значительно превышает концентрацию основных носителей (рис. 11, *е*). Толщина инверсного слоя очень мала и определяется величиной дебаевского радиуса экранирования L_D . Например, как указывалось выше, в *n*-кремнии с концентрацией донорной примеси 10^{16} см^{-3} $L_D \approx 0,04 \text{ мкм}$.

На рис. 11, *з*, показана энергетическая диаграмма полупроводника *p*-типа в режиме инверсии. Видно, что изгиб энергетических зон вниз значительно больше, чем в режиме обеднения, и у поверхности уровень

Ферми находится выше середины запрещенной зоны. Такое положение соответствует энергетической диаграмме донорного полупроводника.

5.2.3. Режим обогащения

При ориентации вектора напряженности электрического поля в противоположную сторону основные носители (дырки) будут притягиваться к поверхности; их концентрация станет выше, чем в объеме. Такое состояние приповерхностного слоя называется режимом обогащения. В обогащенном приповерхностном слое концентрация дырок значительно превышает концентрацию акцепторов.

Если ввести теперь в рассмотрение поверхностный заряд, то его знак и величина будут определять состояние приповерхностного слоя полупроводника в отсутствие внешнего электрического поля. Поверхностный заряд можно считать сосредоточенным на плоскости, поэтому вместе с индуцированным зарядом противоположного знака он создает однородное электрическое поле с напряженностью

$$|\vec{\varepsilon}_{\text{пов}}| = \frac{Q_{\text{пов}}}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (5.4)$$

где $Q_{\text{пов}}$ — поверхностный заряд, приходящийся на единицу площади поверхности, ε_0 — системная электрическая постоянная, ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника. Это означает, что заряд $Q_{\text{пов}}$ изменяет концентрацию носителей в приповерхностной области полупроводника точно так же, как внешнее электрическое поле с напряженностью $|\vec{\varepsilon}| = \frac{Q_{\text{пов}}}{\varepsilon_0}$.

Таким образом, в полупроводнике, в зависимости от знака и величины поверхностного заряда, на глубине порядка дебаевского радиуса экранирования может образовываться либо обедненный, либо инверсный, либо обогащенный слой.

МДП-ТРАНЗИСТОР С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ

Устройство и подключение к источникам напряжений транзистора с индуцированным каналом n -типа показаны на рис. 8, а. На затвор подается положительное напряжение затвор-исток $U_{зи}$. Так как p -подложка электрически соединена с выводом истока, то это напряжение создает электрическое поле, перпендикулярное границе между диэлектриком и полупроводником. При увеличении напряжения $U_{зи}$ такой полярности поверхностный потенциал полупроводника p -типа может превысить пороговое значение (5.3), и под затвором появляется инверсный слой с проводимостью n -типа, образующий проводящую перемычку (канал) между n^+ -областями истока и стока. Важно, чтобы затвор полностью перекрывал промежуток между областями истока и стока (см. рис. 8, а), т.к. в противном случае цепь исток-сток останется разорванной.

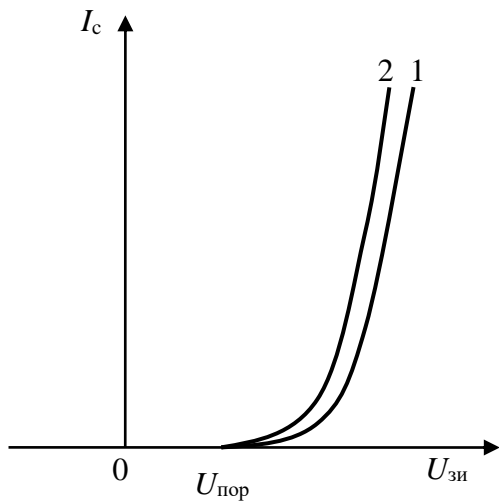


Рис.12. Передаточные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа при двух значениях напряжения сток-исток в рабочей области: $U_{си2} > U_{си1}$. В случае p -канала кривые располагаются зеркально в области отрицательных значений $U_{зи}$.

Напряжение $U_{зи}$, при котором достигается пороговое значение поверхностного потенциала и начинается формирование индуцированного канала, называется пороговым напряжением $U_{пор}$. Ток в цепи стока появится только при условии $U_{зи} \geq U_{пор}$ (см. рис. 12). При увеличении $U_{зи} > U_{пор}$ концентрация основных носителей (электронов) в образовавшемся n -канале растет, и ток стока увеличивается. При напряжениях $U_{зи}$, меньших порогового значения, канал отсутствует, и ток стока можно считать равным нулю, т.к. в этом случае существует только очень малый ток обратного смещенного $n^+ - p$ перехода у стока.

Форма выходных статических характеристик транзистора с индуцированным каналом (рис. 13) такая же, как и для полевого транзистора с управляющим переходом (на рисунке не указана область лавинного пробоя). На начальном линейном участке при малых напряжениях сток-исток сопротивление канала можно считать приблизительно постоянным. Замедление роста тока и последующий выход на пологий участок связаны с процессами, происходящими в канале при увеличении $U_{си}$.

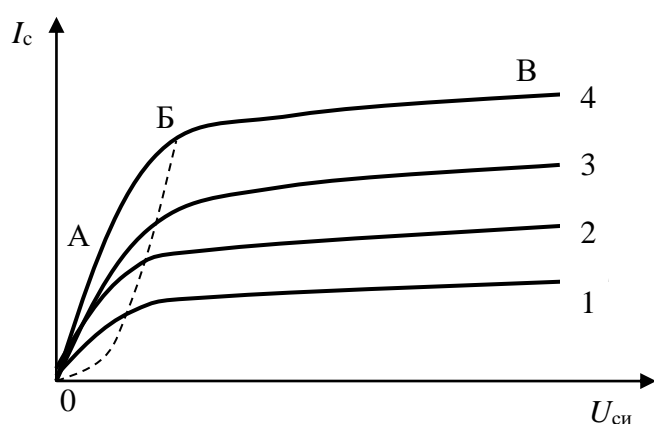


Рис. 13. Выходные статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом. Напряжение затвор-исток возрастает с увеличением номера кривой; $U_{зи1} > U_{пор}$

Так же, как и в транзисторе с управляющим переходом, при протекании тока потенциал проводящего n -канала относительно затвора $U(x)$ повышается по мере приближения к стоку. Величины напряжений, формирующих канал: у истока: $U_{зи} > U_{пор}$; у стока: $U_{зи} - U_{си}$. Это означает, что напряженность электрического поля, создающего инверсный слой, и соответственно концентрация электронов в канале уменьшаются по мере приближения к стоковому концу в тем большей степени, чем выше напряжение сток-исток. Увеличение сопротивления канала приводит к тому, что нарастание тока стока с ростом $U_{си}$ замедляется (участок А-Б, рис. 13)

Дальнейшее возрастание $U_{си}$ приведет к тому, что непосредственно у n^+ -области стока поверхностный потенциал снизится до пороговой величины, и в этой точке индуцированный канал исчезнет (см. рис. 14, а). Иначе говоря, напряжение, формирующее индуцированный канал, снижается в этой точке до порогового значения.

Соответствующее значение напряжения сток-исток называется напряжением насыщения $U_{\text{си нас}}$: $U_{\text{зи}} - U_{\text{си нас}} = U_{\text{пор}}$.

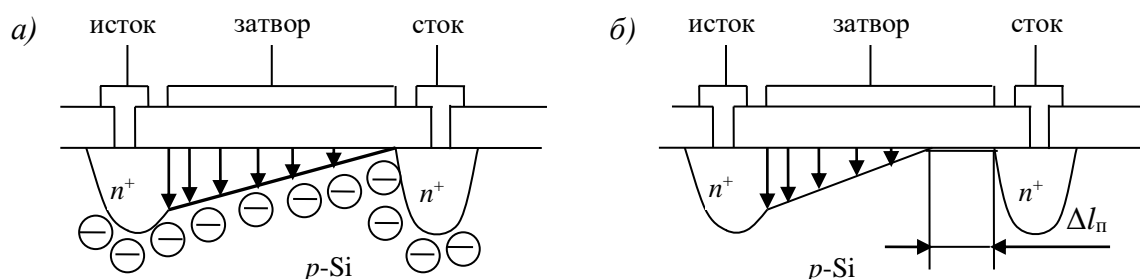


Рис. 14. Изменения, происходящие в индуцированном канале полевого транзистора при увеличении напряжения сток-исток и постоянном напряжении $U_{\text{зи}}$: Кружками обозначены ионы акцепторов. Стрелки указывают направление и величину вектора поперечного электрического поля, создающего инверсный слой. а) $U_{\text{си}} = U_{\text{си нас}}$ б) $U_{\text{си}} > U_{\text{си нас}}$. На рис. б) подложка также отделена от канала ионами акцепторов.

Напряжение насыщения соответствует точке перехода выходной характеристики от нарастания к пологому участку:

$$U_{\text{си нас}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}$$

Видно, что напряжение насыщения растет с увеличением напряжения на затворе (см. штриховую линию на рис. 13).

При дальнейшем росте напряжения сток-исток увеличивается длина «перекрытой» части канала $\Delta l_{\text{п}}$, (рис.14, б). В пределах $\Delta l_{\text{п}}$ напряжение $U_{\text{зи}} - U(x)$, формирующее канал, оказывается меньше порогового, и инверсный слой не образуется (рис.15). На том участке «перекрытия», где $U_{\text{зи}} - U(x) > 0$, устанавливается режим обеднения. При приближении к стоку в тех точках канала, где падение напряжения за счет протекания тока $U(x)$ превышает напряжение $U_{\text{зи}}$, вектор электрического поля, перпендикулярного каналу $\vec{\epsilon}_{\perp}$, меняет направление на 180° из-за смены знака разности потенциалов $U_{\text{зи}} - U(x)$. На этом участке возникает режим обогащения дырками. Тем не менее, несмотря на отсутствие индуцированного канала на длине $\Delta l_{\text{п}}$, ток стока не прекращается: при увеличении $U_{\text{си}}$ на выходных характеристиках наблюдается участок насыщения.

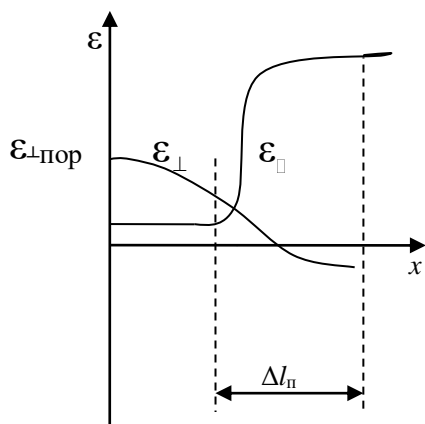


Рис. 15. Распределение продольной $\epsilon_{||}$ и поперечной ϵ_{\perp} составляющих электрического поля по длине канала при его частичном перекрытии

Ограничение и небольшой рост тока стока в области $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$ связаны с одновременным действием нескольких факторов. Во-первых, основное падение приложенного напряжения $U_{си}$ ($U_{си} - U_{си\text{ нас}}$) приходится на перекрытую часть канала, обладающего высоким сопротивлением. Продольное электрическое поле здесь столь велико (см. рис. 15), что электроны, находящиеся в канале у точки перекрытия, захватываются этим полем и перебрасываются в сток. Во-вторых, напряженность продольного электрического поля в перекрытой части канала достигает критического значения, при превышении которого скорость дрейфа носителей в полупроводнике перестает увеличиваться или продолжает расти очень слабо с увеличением $\epsilon_{||}$.

Повышение температуры слабо влияет на характеристики и параметры полевых транзисторов, т.к. это – приборы, «работающие» на основных носителях. Тем не менее, существующая зависимость передаточных характеристик ПТИЗ с индуцированным каналом от температуры позволяет установить режим работы транзистора, при котором возникает так называемая «термостабильная точка» C (рис. 16): параметры транзистора в этом режиме практически не зависят от температуры.

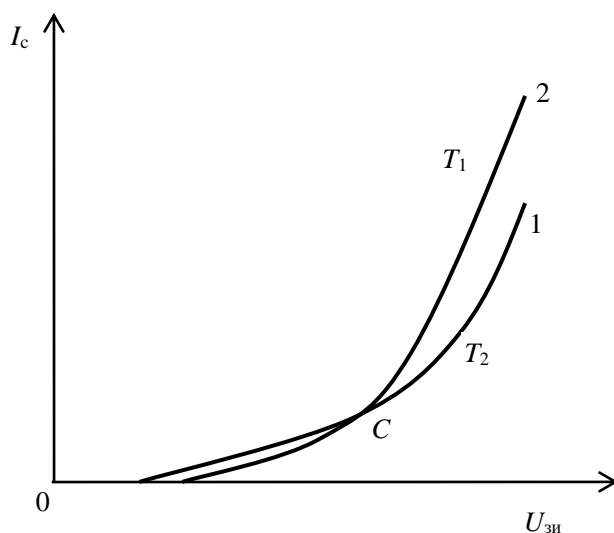


Рис. 16. Изменение передаточной характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом при повышении температуры; $T_2 > T_1$

Такое явление обусловлено двумя причинами. С одной стороны, повышение температуры приводит к уменьшению подвижности носителей в канале, что вызывает уменьшение тока стока. С другой стороны, при этом концентрация неосновных носителей (строго говоря, электронно-дырочных пар) увеличивается за счет тепловой генерации, и уровень Ферми сдвигается к середине запрещенной зоны. В таком случае инверсия типа проводимости и образование индуцированного канала наступит при меньшей напряженности внешнего поля, т.е. при меньшем напряжении затвор-исток.

Если транзистор имеет отдельный вывод подложки, то появляется возможность двойного управления током стока (рис. 17): с увеличением отрицательного по отношению к истоку (и каналу) напряжения на подложке происходит уменьшение поперечного сечения канала. Особенностью механизма управления током стока по подложке является то, что индуцированная n -область канала не содержит ионов доноров, и управляющий p - n -переход подложка-канал отсутствует. Сужение канала происходит из-за увеличения плотности отрицательного объемного заряда ионов акцепторов на границе с каналом: электроны в канале оттесняются вверх к границе с диэлектриком и поперечное сечение канала уменьшается.

В транзисторе со встроенным каналом (см. рис.8, б) между ним и подложкой существует p - n -переход, который, расширяясь при обратном смещении, сдвигает вверх нижнюю границу канала и уменьшает его поперечное сечение. В этом случае принцип управления током стока, такой же, как и в транзисторе с управляющим переходом.

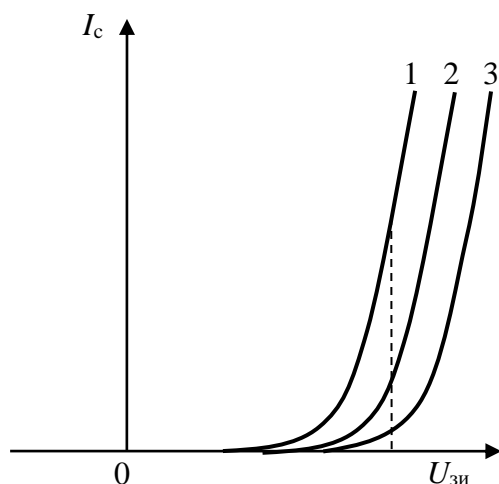


Рис. 17. Сдвиг передаточной характеристики МДП-транзистора с индуцированным n -каналом при изменении напряжения подложка-исток: $U_{си} = const$, $|U_{пи1}| < |U_{пи2}| < |U_{пи3}|$, $|U_{пор1}| < |U_{пор2}| < |U_{пор3}|$

Видно также, что с увеличением значения отрицательного напряжения $U_{\text{зи}}$ увеличивается и пороговое напряжение МДП-транзистора. Это также является следствием возрастания плотности отрицательного объемного заряда ионов акцепторов при обратном смещении перехода подложка-канал. В этом случае для создания режима инверсии, т.е. индуцированного канала, требуется приложить большее напряжение на затвор.

МДП-ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

Встроенный канал транзистора может быть сформирован двумя способами. Во-первых, за счет дополнительной технологической операции при изготовлении, в результате которой образуется перемычка между истоком и стоком с тем же типом проводимости. Во-вторых, канал может быть образован (индуцирован) поверхностным зарядом соответствующей полярности на изолирующем диэлектрике. В таком варианте транзистора индуцированный проводящий канал существует при отсутствии напряжения на затворе, т.е. также является встроенным.

Отличительной особенностью передаточной характеристики транзисторов со встроенным каналом является наличие тока стока при нулевом напряжении $U_{\text{зи}}$ (рис. 18).

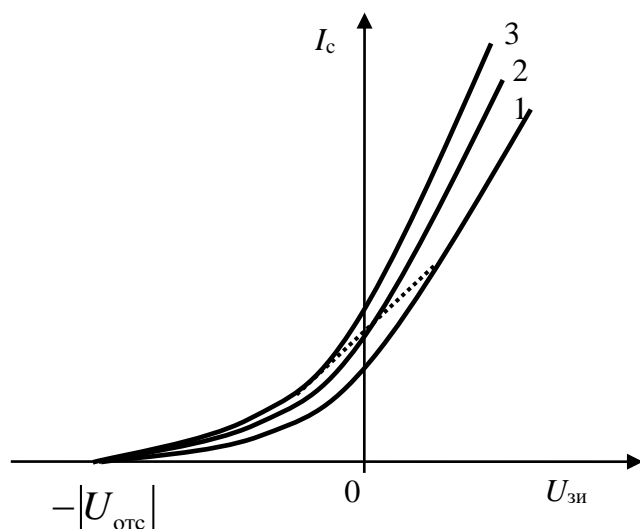


Рис. 18. Передаточные характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа. $U_{\text{зи}1} < U_{\text{зи}2} < U_{\text{зи}3}$. Пунктирная линия — передаточная характеристика при наличии в цепи стока нагрузочного резистора.

В случае канала n -типа при увеличении положительного напряжения $U_{зи}$ ток стока растет, так как происходит обогащение канала электронами – основными носителями. При изменении полярности напряжения затвор-исток электроны вытесняются из канала (т.е. происходит обеднение канала основными носителями), и при напряжении $U_{зи} = U_{отс}$ ток стока прекращается.

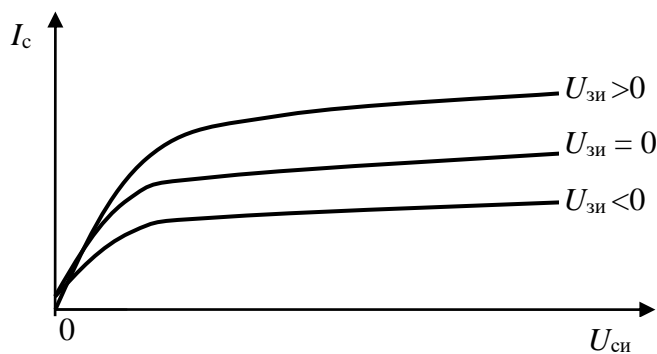


Рис. 19 Выходные статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Форма выходных характеристик МДП-транзистора со встроенным каналом (рис. 19) и индуцированным каналом (рис. 13) одинакова, так как в обоих случаях она определяется изменением конфигурации проводящего канала с ростом напряжения сток-исток.

Напряжение, определяющее концентрацию основных носителей – электронов в n -канале:

У истока: $U_{зи}$, его величина может быть положительной (режим обогащения) или отрицательной (режим обеднения);

у стока: $U_{зи} - U_{си}$.

При увеличении напряжения сток-исток эта разность у стокового конца достигает величины $-|U_{отс}|$:

$$U_{зи} - U_{си} = -|U_{отс}|.$$

Соответствующее напряжение сток-исток – это напряжение насыщения:

$$U_{си \text{ нас}} = |U_{отс}| + U_{зи}$$

В результате у стокового конца канала возникает «точка высокого сопротивления», где основные носители отсутствуют. При этом, как и в ранее рассмотренных случаях, ток стока не уменьшается, а ограничивается. Дальнейшее увеличение $U_{си}$ приводит к увеличению длины «перекрытой» части канала, росту его сопротивления и появлению пологого участка на выходной ВАХ.

В случае, когда встроенный канал обусловлен наличием заряда на диэлектрике, процессы, происходящие в канале при увеличении напряжения сток-исток те же, что и для МДП-транзистора с индуцированным каналом (см. рис. 14).

МДП-транзисторы – важнейшие активные элементы современных микропроцессоров и интегральных схем различного назначения. Основное преимущество логических элементов на их основе – малая потребляемая мощность. На рис. 20 в качестве примера приведена схема инвертора на последовательно соединенных МДП-транзисторах с разной проводимостью индуцированного канала (комплементарных транзисторах).

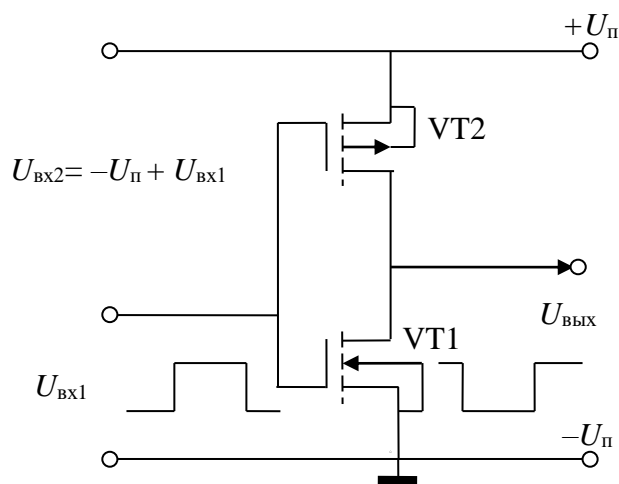


Рис. 20 Схема инвертора на комплементарных МДП-транзисторах

Если входное напряжение инвертора равно нулю (логический ноль), то транзистор VT1 закрыт (его сопротивление $R_1 \rightarrow \infty$), так как индуцированный канал в нем отсутствует. Транзистор VT2 открыт ($R_2 \approx 0$): на его затворе возникает отрицательное по отношению к истоку

напряжение ($U_{п} > U_{пор2}$). Поэтому в данном состоянии выходное напряжение инвертора равно напряжению источника питания $U_{п}$, т.е. на выходе формируется логическая единица.

При смене логического состояния на вход транзистора подается положительный скачок напряжения $U_{вх1} > U_{пор1}$. Транзистор VT1 открывается ($R_1 \approx 0$), а на затворе второго транзистора напряжение $-U_{п} + U_{вх1}$ становится меньше порогового, и VT2 закрывается ($R_2 \rightarrow \infty$). Видно, что в любом логическом состоянии схема инвертора практически не потребляет электрическую мощность: протекающий ток – это ничтожный ток утечки закрытого МДП-транзистора. Такие схемы расходуют энергию только при переключении.

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР КАК УСИЛИТЕЛЬ МАЛОГО ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА

При работе транзистора в схеме усилителя в цепь стока включается либо активный, либо реактивный нагрузочный элемент (резистор, катушка индуктивности, обмотка трансформатора). Рассмотрим работу усилителя на полевом транзисторе с активной нагрузкой (рис. 21).

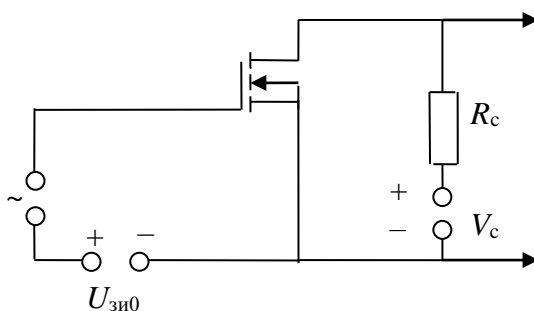


Рис. 21. Простейшая схема усилителя переменного сигнала на полевом транзисторе

В цепи стока включен нагрузочный резистор R_c . Таким образом, к источнику питания V_c подключается делитель напряжения, состоящий из нагрузочного резистора R_c и сопротивления проводящего канала полевого транзистора. Выходным напряжением усилительного каскада является падение напряжения на полевом транзисторе $U_{си}$. Увеличение тока через транзистор при соответствующем изменении напряжения на затворе происходит за счет уменьшения сопротивления канала; это

приводит к уменьшению выходного напряжения и к возрастанию падения напряжения на R_c .

Вольтамперная характеристика такого усилителя (нагрузочная прямая) показана на рис. 22.... Она представляет собой линейную зависимость выходного напряжения $U_{си}$ от тока стока: $U_{си} = V_c - I_c \cdot R_c$, при этом $R_c = \text{ctg } \alpha$.

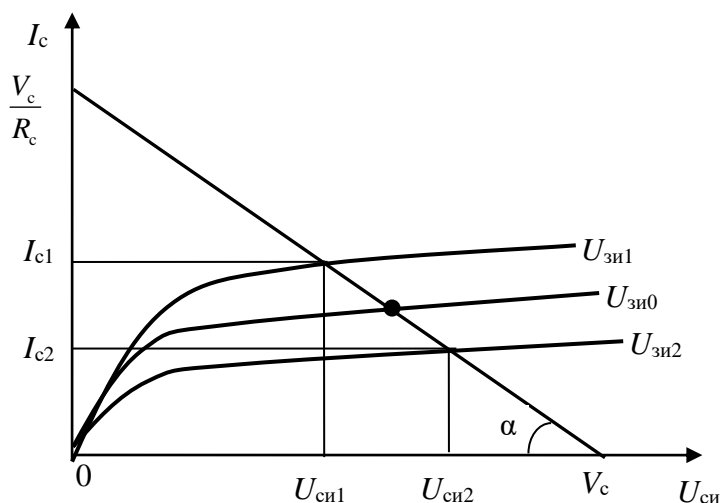


Рис. 22. Нагрузочная прямая для усилительного каскада на полевом транзисторе. $U_{зи0}$ — напряжение на затворе, соответствующее выбранной рабочей точке.

При малом изменении входного переменного сигнала падение напряжения на транзисторе изменится на величину:

$$dU_{си} = -R_c dI_c,$$

Изменение тока стока при этом описывается следующим образом:

$$dI_c = S dU_{зи} + \frac{1}{R_i} dU_{си}, \quad \left(R_i = \frac{1}{g_{22}} = r_{Д\text{ВЫХ}} \right)$$

или

$$dI_c = S dU_{зи} - \frac{R_c}{R_i} dI_c; \quad \left(1 + \frac{R_c}{R_i} \right) dI_c = S dU_{зи}$$

Отсюда выводится так называемая «рабочая крутизна»:

$$S_p = \frac{dI_c}{dU_{зи}} = \frac{S}{1 + \frac{R_c}{R_i}} = \frac{SR_i}{R_i + R_c}.$$

Ее величина меньше статической крутизны S . График передаточной характеристики полевого транзистора при наличии нагрузочного резистора R_c идет более полого из-за того, что падение

напряжения на транзисторе $U_{си}$ уменьшается с ростом тока стока (см. рис. 18).

Рабочий коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \left| \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right| = \frac{R_c dI_c}{dU_{зи}} = S_p R_c \qquad K_U = \frac{SR_i R_c}{R_i + R_c}$$

Его величина обычно составляет несколько единиц, что значительно меньше статического коэффициента усиления $\mu_{yc} = SR_i$. Типичные значения крутизны и внутреннего сопротивления для маломощных полевых транзисторов составляют 2 мА/В и 20 кОм соответственно. Выбрав $R_c = 2$ кОм, легко подсчитать, что при этом $\mu_{yc} = 40$, а $K_U = 3,6$.

Рабочий коэффициент усиления по напряжению можно определить, используя графики на рис. 22. Пусть на вход подается малый переменный сигнал: $u_{зи} = u_m \sin \omega t$. Тогда $U_{зи1} = U_{зи0} + u_m$, $U_{зи2} = U_{зи0} - u_m$. Выходное напряжение при этом будет изменяться в пределах $U_{си1}$ до $U_{си2}$. Следовательно,

$$K_U = \frac{U_{си2} - U_{си1}}{U_{зи1} - U_{зи2}}$$

Рабочую крутизну с помощью тех же графиков можно выразить следующим отношением:

$$S_p = \frac{I_{c1} - I_{c2}}{U_{зи1} - U_{зи2}}$$

МДП-ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Главными достоинствами полевых транзисторов с изолированным затвором является ничтожная электрическая мощность, потребляемая в управляющей цепи затвора и достаточно высокое быстродействие. В связи с этим были разработаны мощные МДП-транзисторы для устройств силовой электроники.

Известно, что для горизонтальной структуры зависимость тока стока насыщения от геометрических параметров канала и от напряжения на затворе $U_{зи}$ выглядит следующим образом:

$$I_{\text{с нас}} \propto \frac{b}{2l} (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})^2,$$

где b и l – ширина и длина канала, $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение транзистора. Поэтому для увеличения тока стока в «горизонтальном» транзисторе следовало бы уменьшать длину канала, но при этом неизбежно уменьшилось бы напряжение пробоя, что нежелательно при использовании транзистора в устройствах большой мощности.

В отличие от маломощных элементов интегральных схем и дискретных приборов мощные МДП-транзисторы имеют вертикальную структуру: вывод стока расположен снизу, а не на одном уровне с истоком (рис. 23). При этом, несмотря на небольшую длину канала (1-2 мкм), напряжение пробоя достигает значений многих сотен вольт.

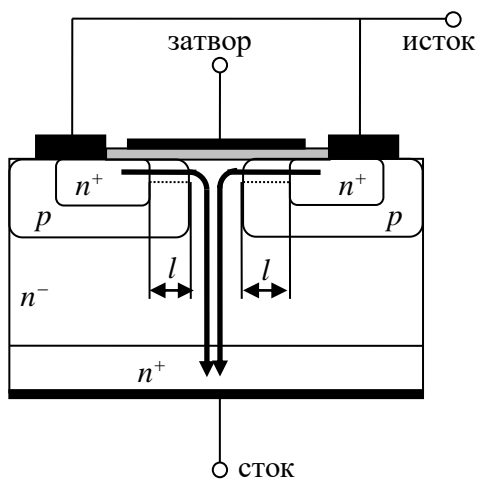


Рис. 23. Структура мощного МДП-транзистора с индуцированным каналом. Нижняя граница канала обозначена пунктиром. Области истока и «p-подложки» имеют общий вывод.

При превышении порогового напряжения на затворе ($U_{\text{зи}} > U_{\text{пор}}$) на участках p-областей, находящихся под затвором у границы с диэлектриком, возникают индуцированные n-каналы длиной l , через которые проходят электроны из истока в n⁻-область. Затем они увлекаются вниз ускоряющим полем и через n⁻-слой попадают в область стока (стрелки на рис. 23). Наличие слаболегированной n⁻-области позволяет подавать высокое напряжение между стоком и истоком; наибольшая величина этого напряжения зависит от концентрации примеси в n⁻-слое и его толщины.

Понятие «канал» в таких транзисторах включает в себя не только возникающий индуцированный канал длиной l , но и области n^- и n^+ , через которые проходят электроны к выводу стока. Это – области, определяющие сопротивление, через которое в транзисторе протекает ток стока. В низковольтных транзисторах основной вклад в сопротивление канала дает n^+ -слой, т.к. толщина n^- -слоя невелика. В транзисторах с номинальными напряжениями сток-исток в несколько сотен вольт сопротивление канала определяется n^- -слоем.

Величина порогового напряжения в таких транзисторах составляет 2-4 В, напряжение сток-исток может достигать нескольких сотен вольт, ток стока – десятков ампер.

Такие транзисторы предназначены, как правило, для работы в ключевом режиме в устройствах управления и переключения в мощных электрических цепях.