

ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА КМДП-ТРАНЗИСТОРАХ

3.1. Общие сведения о полевых транзисторах

Из многочисленных серий цифровых ИС на полевых транзисторах наибольшее распространение получили микросхемы на комплементарных полевых транзисторах с изолированным затвором. Полевые транзисторы с диэлектриком на основе окислов кремния принято называть МОП-транзисторами (металл — окисел — полупроводник). При использовании иных или слоистых диэлектриков транзисторы называют МДП-транзисторами (металл — диэлектрик — полупроводник). Более общим названием является последнее, поэтому условимся называть ИС на комплементарных полевых транзисторах с изолированным затвором как КМДП ИС. Слово «комплементарный» означает «взаимно дополняющий». Так называют пару транзисторов, имеющих примерно одинаковые значения основных параметров, но с полупроводниковыми структурами, взаимно отображенными как бы в виде негатива и позитива. В биполярной технологии — это транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$, в полевой технологии — транзисторы с p - и n -каналами. Совместное использование такой пары МДП-транзисторов лежит в основе комплементарной структуры.

Для понимания работы этой структуры рассмотрим вначале работу отдельного МДП-транзистора. На рис. 3.1 приведены физические структуры МДП-транзисторов с каналами p - и n -типов. В чистом или слабо легированном кремнии, который называют подложкой, диффузией созданы сильно легированные области противоположного по сравнению с подложкой типа проводимости. Это области стока (С) и истока (И). Металлический электрод затвора (З) (алюминий, молибден, вольфрам или легированный поликристаллический кремний) изолирован от подложки слоем диэлектрика толщиной порядка $0,1 \dots 0,15$ мкм. Для этой цели может использоваться любой диэлектрик, обладающий необходимыми электрофизическими параметрами. В качестве подзатворного диэлектрика используются: оксид кремния, нитрид кремния, оксид алюминия. Подзатворный диэлектрик может быть однослойным и двухслойным.

МДП-транзисторы делятся на две группы: транзисторы с индуцированным каналом и транзисторы со встроенным каналом. Основным отличием этих двух групп МДП-транзисторов является то, что приборы с индуцированным каналом не проводят тока при нулевом напряжении на затворе, а приборы со

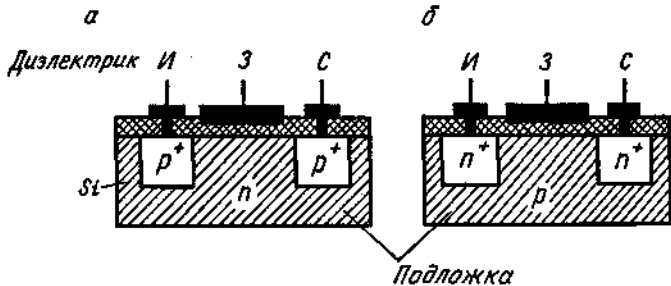


Рис. 3.1. МДП-транзистор с p - и n -каналами

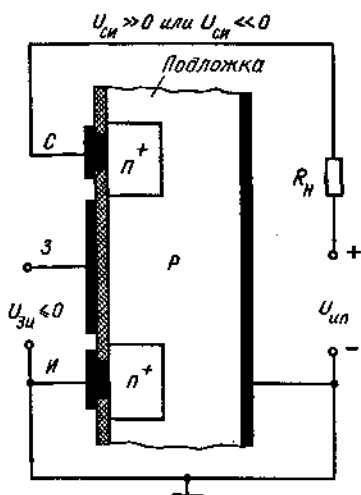


Рис. 3.2. МДП-транзистор с индуцированным каналом, включенный по схеме с общим истоком в закрытом состоянии

встроенным каналом в таком режиме имеют начальный ток. В КМДП ИС используются, как правило, МДП-транзисторы с индуцированными каналами, включенными по схеме с общим истоком. Для n -канального МДП-транзистора схема с общим истоком приведена на рис. 3.2, в которой p -подложка соединена с истоком.

Из структуры МДП-транзистора с индуцированным каналом видно, что основу прибора составляют два встречно включенных диода, на которые через резистор нагрузки R_n подано напряжение источника питания стока $U_{и.л.}$. Для транзистора с каналом n -типа на сток подается положительное напряжение относительно истока, который соединен с общей шиной. Если напряжение на затворе (U_z) равно нулю, то МДП-транзистор с индуцированным каналом по своим свойствам — это просто два встречно включенных диода. Ток между стоком и истоком отсутствует, поскольку один из двух диодов смещен в обратном направлении при любой полярности напряжения сток — исток (рис. 3.2). Такой режим МДП-транзистора называют режимом отсечки.

Проводимость в МДП-транзисторе с индуцированным каналом n -типа создается при подаче на затвор положительного (относительно истока и подложки) напряжения. При этом дырки в объеме p -кремния под воздействием электрического поля вытесняются в сторону от затвора. К подзатворной области притягиваются электроны. Когда в подзатворной области скапливается достаточное количество электронов, тип проводимости в данной области меняется (инвертируется) на противоположный, т. е. с дырочного на электронный. Полученный таким образом инверсионный слой с электронной проводимостью называется n -каналом, и он простирается от истока до стока, образуя достаточно тонкую «перемычку» между n^+ -областями (рис. 3.3). При этом на границе канала и областей стока, истока образуется обедненная область, благодаря которой обеспечивается самоизоляция рабочей области МДП-транзистора от других элементов ИС, выполненных на одной подложке. Напряжение, при котором начинает возникать n -канал (тонкий инверсионный слой), называется пороговым напряжением открывания МДП-транзистора с индуцированным каналом ($U_{зп,пор}$) и является важным параметром транзистора.

Ширина n -канала зависит от напряжения на затворе и имеет примерно одинаковую ширину вдоль затвора только при условии, если напряжение стока равно нулю или значительно меньше напряжения на затворе, т. е. $U_{н,л} = 0$ или $U_{ск} \ll U_{зп}$ (рис. 3.3). В этом режиме сохраняется примерная пропорциональность между током стока (I_c) и напряжением на затворе. На семействе статических стоковых (выходных) вольт-амперных характеристик (рис. 3.5) эта область работы обозначена как линейная область. Отсюда следует вывод о том, что сопротивление канала МДП-транзистора в линейной области можно изменять в широких пределах путем изменения напряжения, прикладываемого к затвору.

Если напряжение на стоке МДП-транзистора превышает напряжение на его затворе, то наведенный n -канал имеет неравномерную ширину, потому что на носители заряда влияет не только $U_{зп}$, но и $U_{ск}$. Примерная конфигурация n -канала и обедненной области в этом режиме изображены на рис. 3.4. При увеличении $U_{ск}$ форма канала начинает деформироваться путем уменьшения его ширины сначала в зоне, прилегающей к стоку, а затем по всей длине канала. Причиной таких изменений является нарастающее по длине канала омическое падение напряжения, создающее в объеме p -кремния поле, которое компенсирует поле, созданное $U_{зп}$. При некотором напряжении на стоке обедненный слой перекрывает канал в зоне стока. Соответствующее напряжение на стоке называется напряжением насыщения ($U_{ск,нас}$). Дальнейшее увеличение напряжения $U_{ск}$ практически не приводит к росту тока I_c , а лишь увеличивает напряженность поля в обедненном слое. Этот режим МДП-транзистора называется режимом насыщения (или режимом ограничения тока). Область насыщения обозначена на рис. 3.5.

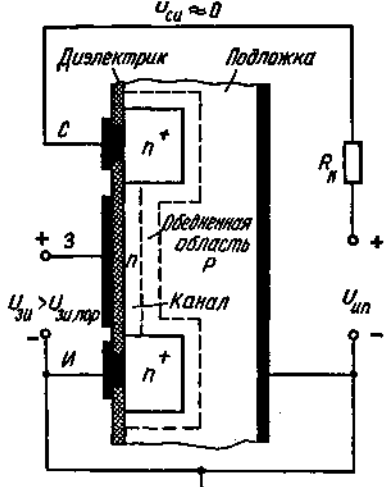


Рис. 3.3. МДП-транзистор с индуцированным каналом в режиме управляемого сопротивления

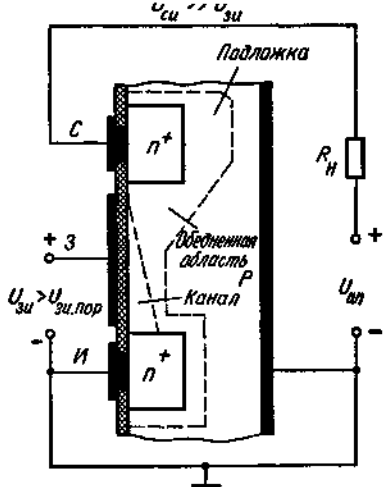


Рис. 3.4. Конфигурация канала МДП-транзистора с индуцированным каналом в режиме насыщения

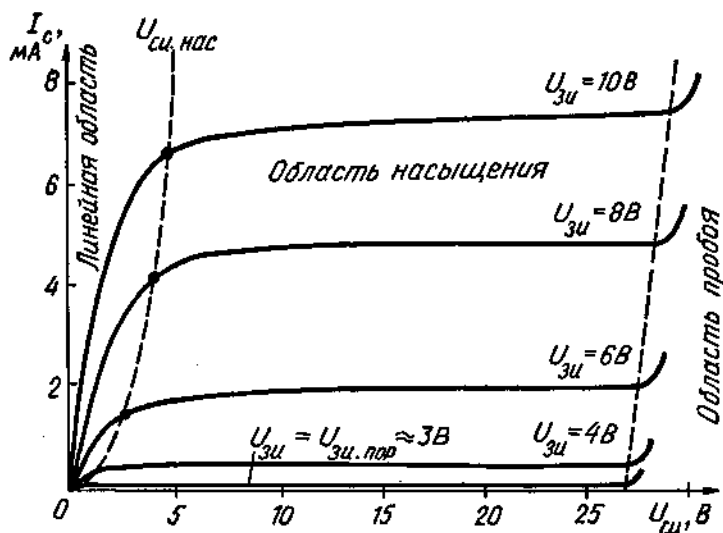


Рис. 3.5. Семейство статических стоковых характеристик МДП-транзистора с каналом n-типа

При работе МДП-транзистора в режиме насыщения вблизи стока существует узкая проводящая область, в которой плотность тока и электрическое поле велики. Явление переноса носителей в этой области (от точки перекрытия канала до стока) подобно инъекции носителей эмиттером биполярного транзистора в обедненную область обратносмещенного коллекторного перехода.

В процессе дальнейшего увеличения $U_{си}$ обедненный слой распространяется на всю длину канала, что приводит в конечном счете к лавинообразному пробое промежутка сток — исток (область пробоя на рис. 3.5).

Таким образом, на семействе статических стоковых вольт-амперных характеристик можно выделить три области (рис. 3.5):

1) линейную (изменение тока стока почти пропорционально напряжению на стоке);

2) область насыщения (ток стока слабо зависит от напряжения на стоке);

3) область пробоя (ток стока резко возрастает при малых изменениях напряжения на стоке).

Пороговое напряжение открывания МДП-транзистора оказывается тем меньше, чем выше степень легирования канала и чище поверхность кремния в подзатворной зоне. Этим начальным напряжением нейтрализуются, как бы «разгоняются»; паразитные заряды, скапливающиеся на загрязнениях и дефектах поверхности. Для специальных особо низковольтных МДП-транзисторов пороговое напряжение может быть снижено до 0,2...0,3 В технологическими приемами.

Аналогичное описание имеет работа p -канального МДП-транзистора, если во всех рассуждениях тип проводимостей и полярности напряжения питания поменять на обратные.

Рассмотрим теперь элементарную комплементарную структуру — инвертор, содержащий два МДП-транзистора с индуцированными каналами n - и p -типа. Проходные вольт-амперные характеристики этих транзисторов приведены на рис. 3.6, а структура, электрическая схема и передаточная характеристика КМДП-инвертора — на рис. 3.7.

В этой структуре для изоляции n -канального транзистора используется «карман» p -типа, играющий роль подложки для указанного транзистора. Необходимое при этом обратное смещение p - и n -перехода между подложками n - и p -типов транзисторов обеспечивается при подаче на исток p -канального транзистора и на n -подложку положительного напряжения питания $U_{н.п.}$, при этом p -подложка соединена с общей шиной и истоком n -канального транзистора.

Схема работает следующим образом. Допустим, в исходном состоянии напряжение на затворах равно нулю. При этом n -канальный МДП-транзистор находится в режиме отсечки, т. е. закрыт, а p -канальный транзистор открыт и работает в линейной области с большим отрицательным напряжением на затворе (относительно его истока) и практически без тока стока. Поэтому

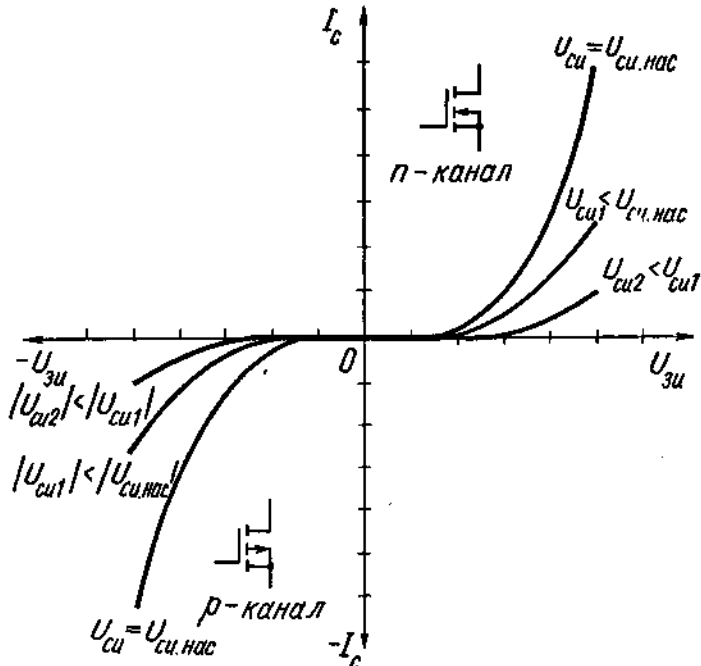


Рис. 3.6. Переходные ВАХ МДП-транзисторов с индуцированными каналами *n*- и *p*-типов

падение напряжения между истоком и стоком *p*-канального транзистора минимально, а напряжение на выходе КМДП-инвертора практически равно $U_{н.п.}$

При напряжении на затворах, близком к величине $U_{н.п.}$, *p*-канальный транзистор закрыт, а *n*-канальный работает в линейной области без тока стока, поэтому на выходе КМДП-инвертора напряжение равно нулю.

При напряжении на затворах в диапазоне $U_{зк.пор1} < U_{зк} < <(U_{н.п.} - U_{зк.пор2})$, где $U_{зк.пор1}$ и $U_{зк.пор2}$ — соответственно пороговые напряжения открывания транзисторов *VT1* и *VT2* (рис. 3.7, б), оказываются открытыми оба транзистора, что приводит к появлению сквозного тока в КМДП-инверторе (при условии $U_{зк.пор1} + U_{зк.пор2} < U_{н.п.}$). Однако такой режим работы инвертора возможен лишь кратковременно во время переключения предыдущего КМДП-инвертора (или другого цифрового устройства).

Основным преимуществом КМДП-инвертора по сравнению с другими инверторами на МДП-транзисторах является малая статическая мощность, потребляемая от источника питания

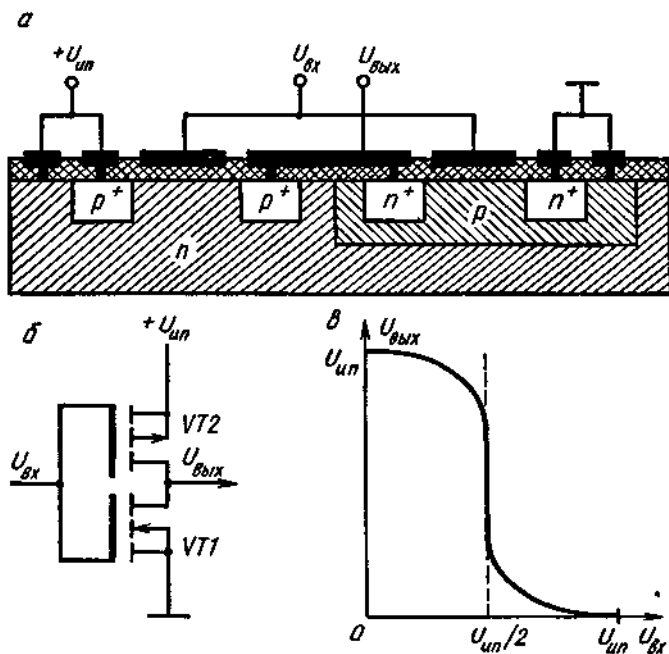


Рис. 3.7. Комплементарный МДП-инвертор:
 а — структура; б — электрическая схема; в — передаточная характеристика

(порядка нановатт), что обеспечивается за счет отсутствия сквозного тока в статическом режиме. Кроме этого, КМДП-инвертор имеет высокую помехоустойчивость, широкий диапазон рабочих напряжений (обычно от 3 до 15 В) и широкий диапазон рабочих температур (от -55 до $+125$ °С) [8]. Эти качества КМДП-инвертора обеспечили популярность и высокие эксплуатационные показатели ИС на его основе.

В качестве других эксплуатационных характеристик КМДП ИС, свойственных только им, следует назвать: работоспособность в широком диапазоне питающих напряжений (3...15 В), высокую помехозащищенность, достигающую 30...45 % от значения питающего напряжения, высокую нагрузочную способность, составляющую до 1000 входов таких же ИС на частотах до нескольких килогерц, высокое входное сопротивление ($\sim 10^{12}$ Ом), упрощенное сопряжение со слаботочными источниками входного напряжения. Кроме того, имеются и существенные преимущества в технологии КМДП ИС по сравнению с биполярными ИС, к наиболее важным из которых относятся: меньшее (почти в 3 раза) число технологических операций; самоизоляция от других элементов, расположенных на одной подложке; более высокая степень интеграции (30 %) на кристалле.

Исключительно малая потребляемая мощность открывает для КМДП ИС широкую перспективу применения, в первую очередь в устройствах с автономным питанием: различных бортовых устройствах, автономных устройствах сбора и обработки данных, запоминающих устройствах без разрушения информации, т. е. там, где энергетический фактор оказывается решающим при выборе элементной базы и где по существу им нет альтернативы.

Перспективно применение КМДП ИС и там, где, потребление мощности не имеет жестких ограничений. Учитывая, что при использовании биполярных ИС требуется создание мощных вторичных источников питания, удельный вес которых в общих массогабаритных характеристиках занимает до 40...50 %, становится очень привлекательной идея применения, по возможности и здесь, КМДП ИС, резко снижающих указанные затраты как за счет непосредственного уменьшения потребляемого тока, так и в результате уменьшения требований по степени фильтрации питающих напряжений, что становится возможным благодаря их высокой помехоустойчивости. В конечном счете дополнительно улучшается температурный режим аппаратуры и повышается ее надежность, а также отпадает необходимость в организации сложных систем охлаждения ИС.

Большое количество положительных качеств обеспечивает широкое использование КМДП ИС в различной радиоэлектронной аппаратуре. Основной задачей совершенствования этого класса ИС является повышение их быстродействия, доводя его до уровня, достигнутого биполярными ИС. Решение этой задачи связано с уменьшением емкостей перехода и сводится к поиску оптимальных топологий, использованию новых технологий производства МДП ИС, уменьшению линейных размеров ИС.

Одним из оригинальных результатов в области новых топологий КМДП ИС явился переход к V-образной форме затвора, в которой кремниевый затвор полностью окружает (пространственно замыкает) стоковые области. Такая замкнутая структура позволяет увеличить степень интеграции и быстродействие по сравнению со стандартной технологией КМДП ИС в 4...5 раз. Технология ИС с указанным затвором получила название K^2L технологии.

Другой путь повышения быстродействия, связанный с использованием новых изоляционных материалов, привел к созданию КМДП ИС на сапфире (КНС), для которых задержку на инвертор удалось уменьшить в 2 раза.

В общем случае следует заметить, что все результаты по повышению быстродействия достигаются уменьшением емкости переходов, в то время как входная емкость практически не может быть уменьшена ниже 15 пФ.

Второй задачей совершенствования КМДП ИС является защита от статического электричества. Высокое сопротивление подзатворного диэлектрика ($\sim 10^{14}$ Ом) в сочетании с его малой толщиной (обычно 0,1...0,15 мкм) приводит к тому, что стати-

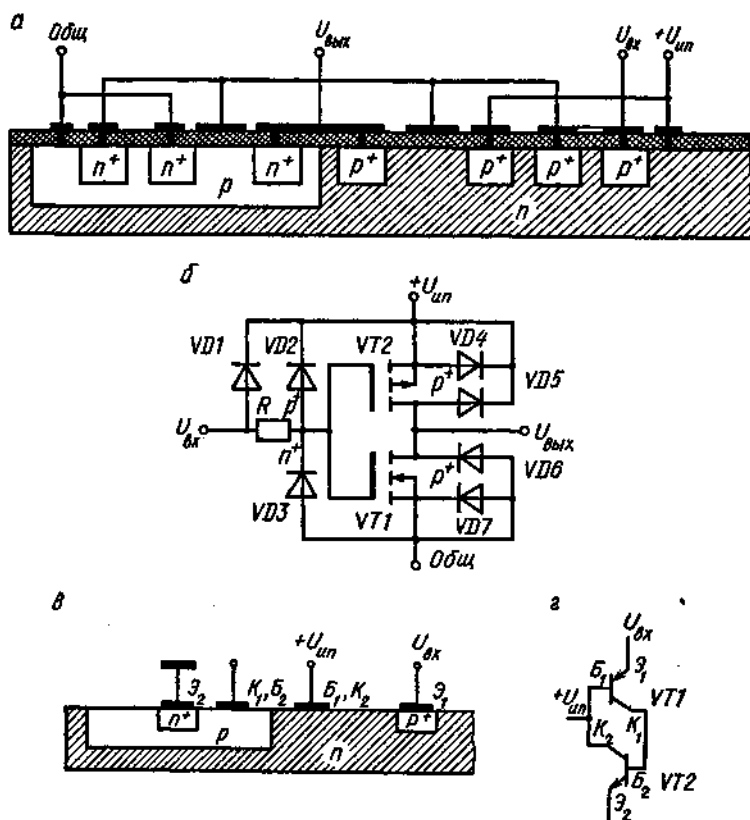


Рис. 3.8. КМДП-инвертор со схемой защиты затвора от статического электричества:

а — структура; б — эквивалентная электрическая схема; в — паразитные биполярные транзисторы; г — паразитная тиристорная структура

ческий заряд способен создать пробивное напряжение и привести к отказу ИС. Для защиты от высоковольтных зарядов статического электричества на входах ИС (например, серии 564) имеется специальная диодно-резисторная схема защиты (рис. 3.8). Диоды $VD1...VD3$ защищают изоляцию затвора от пробоя. Диод $VD1$ имеет пробивное напряжение порядка 25 В, а диоды $VD2, VD3$ — 50 В. Диоды $VD4...VD7$ защищают выход инвертора от пробоя между n^+ и p^+ -областями. Они также имеют пробивное напряжение от 25 до 50 В и являются составной частью структуры. Диоды $VD5$ и $VD6$, включенные последовательно между шинами питания, защищают канал от ошибочной перемены полярности питания.

При применении в ИС рассмотренной схемы защиты недопустима подача на вход напряжения, превышающего напряжение питания более чем на 0,2 В. Это связано с активизацией паразитных биполярных транзисторов, которые составляют аналог паразитной тиристорной структуры. Рис. 3.8, в, г поясняют принцип образования тиристорной структуры из $p-n-p$ транзистора $VT1$ и $n-p-n$ транзистора $VT2$. Если напряжение на входе КМДП-инвертора (на эмиттере $VT1$) превысит $U_{н.п.}$ (на базе $VT1$), то это приводит к открыванию $VT1$ и лавинообразному включению всей тиристорной структуры за счет положительной обратной связи между базами и коллекторами транзисторов. Далее тиристорная структура поддерживает открытое состояние. Если входной ток не ограничен внешним резистором, то комбинентарная пара может разрушиться. Для исключения этого явления включение схем на КМДП ИС, использующих различные источники питания, должно обеспечивать первоочередную подачу напряжения питания, а затем подключение управляющих сигналов. Кроме того, если позволяют требования по быстродействию, желательно включение во входные цепи ограничивающих резисторов.