

Лекция 7

Тема: Пассивные и активные элементы полупроводниковых интегральных микросхем (Продолжение)

- 1) Полевые транзисторы.
- 2) Конструкция МДП-транзистора.

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

Полевые транзисторы (ПТ), хорошо вписываются в общую технологию биполярных ИС и потому часто изготавливаются совместно с биполярными транзисторами на одном кристалле. Типичные структуры ПТ, расположенные в изолированных карманах, показаны на рис. 56.

В структуре, показанной на рис. 56, а, p -слой затвора образуется на этапе базовой диффузии, а n^+ -слои, обеспечивающие омический контакт с областями истока и стока, – на этапе эмиттерной диффузии. Заметим, что p -слой затвора окружает сток со всех сторон, так что ток между истоком и стоком может протекать только через управляемый канал.

В n -карманах, предназначенных для ПТ, вместо скрытого n^+ -слоя осуществляется скрытый p^+ -слой. Назначение этого слоя – уменьшить начальную толщину канала а и тем самым напряжение отсечки. Осуществление скрытого p^+ -слоя связано с дополнительными технологическими операциями. Для того чтобы скрытый p^+ -слой проник в эпитаксиальный слой достаточно глубоко, в качестве акцепторного диффузанта используют элементы с большим коэффициентом диффузии (бор или галлий).

На подложку, а значит, и на p^+ -слой задают постоянный (максимально отрицательный) потенциал; поэтому они не выполняют управляющих функций.

Структура, показанная на рис. 56, б, совпадает со структурой обычного n - p - n -транзистора. Роль канала играет участок базового p -слоя, расположенный между n^+ - и n -слоями. Если при совместном изготовлении ПТ и биполярного транзистора не использовать дополнительных технологических процессов, то толщина канала будет равна ширине базы n - p - n -транзистора (0,5-1 мкм). При такой малой толщине канала получают большой разброс параметров ПТ и малое напряжение пробоя. Поэтому целесообразно пойти на усложнение технологического цикла, осуществляя p -слой ПТ отдельно от базового p -слоя, с тем чтобы толщина

канала была не менее 1-2 мкм. Для этого проводят предварительную диффузию p -слоя ПТ до базовой диффузии. Тогда во время базовой диффузии p -слой ПТ дополнительно расширяется, и его глубина оказывается несколько больше глубины базового слоя.

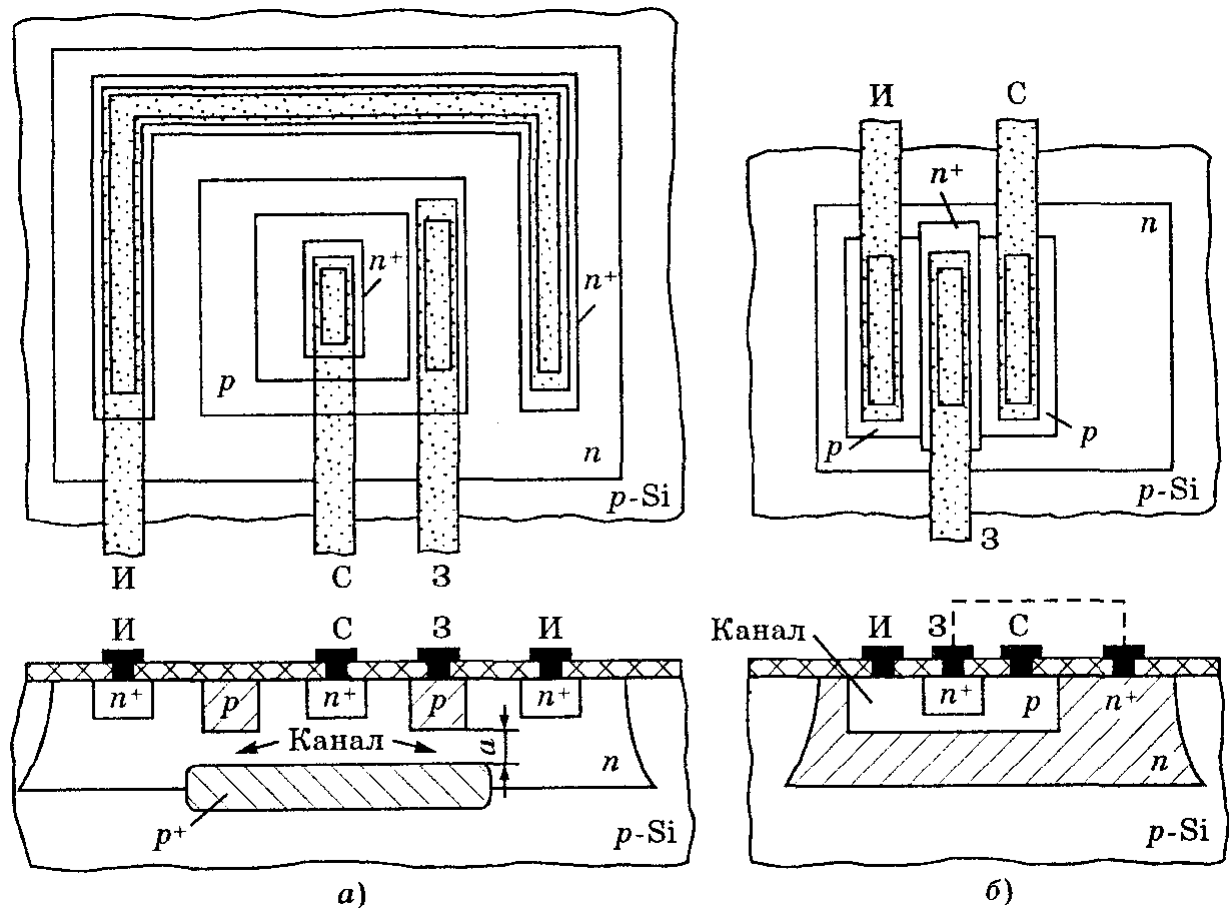


Рис. 56. Интегральные полевые транзисторы с n -каналом (а) и с p -каналом (б)

Для того чтобы области истока и стока соединялись только через канал, n^+ -слой делают более широким (в плане), чем p -слой (рис. 56, б). В результате n^+ -слой контактирует с эпитаксиальным n -слоем и вместе они образуют «верхний» и «нижний» затворы. В нижней части рис. 56, б контакт между «верхним» и «нижним» затворами условно показан

штриховой линией. Подложка *p*-типа присоединяется к максимальному отрицательному потенциалу.

МДП-ТРАНЗИСТОРЫ

Вообще говоря, совместное изготовление МДП- и биполярных транзисторов на одном кристалле, в едином технологическом цикле возможно, но является специальным случаем. Как правило, биполярные и МДП-транзисторные ИС разрабатываются и изготавливаются отдельно. Эти два типа ИС предназначены либо для решения разных функциональных задач, либо для решения одной и той же задачи, но с использованием преимуществ соответствующего класса транзисторов. Главную роль в современной микроэлектронике играют МДП-транзисторы, в которых диэлектриком является SiO_2 , их называют МОП-транзисторами.

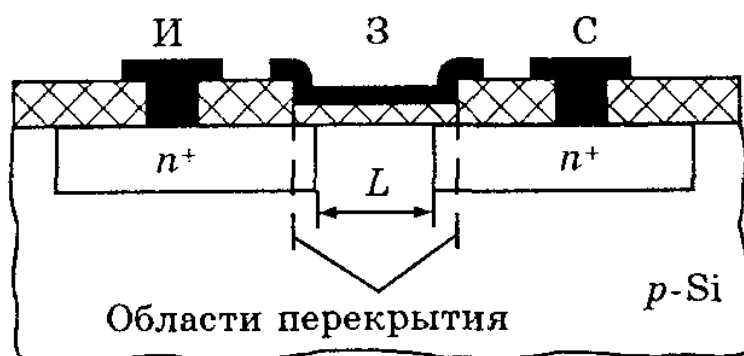


Рис. 57. Интегральный МОП-транзистор (с перекрытием затвора)

Простейший МОП-транзистор. Поскольку интегральные МДП-транзисторы, не нуждаются в изоляции, их структура внешне не отличается от структуры дискретных вариантов. На рис. 57 воспроизведена структура МОП-транзистора с индуцированным *n*-каналом. Отметим особенности этого транзистора как элемента ИС.

Из сравнения рис. 36, 51 и 52 очевидна, прежде всего, технологическая простота МОП-транзистора по сравнению с биполярными: необходимы всего лишь один процесс диффузии и четыре процесса фотолитографии (под диффузию, под тонкий окисел, под омические контакты и под металлизацию). Технологическая простота обеспечивает меньший брак и меньшую стоимость.

Отсутствие изолирующих карманов способствует лучшему использованию площади кристалла, т.е. повышению степени интеграции элементов. Однако, с другой стороны, отсутствие изоляции делает подложку общим электродом для всех транзисторов. Это обстоятельство может привести к различию параметров у внешне идентичных транзисторов. Действительно, если на подложку задан постоянный потенциал, а истоки транзисторов имеют разные потенциалы (такое различие свойственно многим схемам), то будут разными и напряжения $U_{\text{ни}}$ между подложкой и истоками. Это равносильно различию пороговых напряжений МДП-транзисторов.

Как известно, главным фактором, лимитирующим быстродействие МДП-транзисторов, обычно являются паразитные емкости. Металлическая разводка, используемая в ИС, гораздо компактнее проволочного монтажа, свойственного узлам и блокам, выполненным на дискретных компонентах. Поэтому паразитные емкости интегрального МОП-транзистора меньше, чем дискретного, а его быстродействие соответственно в несколько раз выше.

Паразитные барьерные емкости переходов истока и стока ($C_{\text{пи}}$ и $C_{\text{пс}}$) МДП-транзистора при размерах n^+ -слоев 20×40 мкм лежат в пределах 0,04-0,10 пФ.

Удельная емкость металлизации определяется элементарной формулой

$$C_{0\text{м}} = \varepsilon_0 \varepsilon / d, \quad (17)$$

где d – толщина защитного окисла, ε – его диэлектрическая проницаемость. Подставляя $\varepsilon = 4,5$ и $d = 0,7$ мкм, получаем типичное значение $C_{0\text{м}} \approx 60$ пФ/мм². При ширине полосы металлизации 15 мкм

погонная емкость составит 0,9 пФ/мм. Как видим, полоски длиной всего 50-100 мкм могут иметь емкость 0,05-0,09 пФ, сравнимую с емкостями переходов $C_{\text{пи}}$ и $C_{\text{пс}}$. Еще больший вклад вносят контактные площадки: при площади $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ их емкость составляет около 0,6 пФ.

Емкости перекрытия $C_{\text{пи}}$ и $C_{\text{пс}}$ не поддаются сколько-нибудь точному расчету, так как площадь перекрытия характерна большим разбросом из-за неровности краев металлизации затвора и границ диффузионных слоев (рис. 57). Порядок величин можно оценить, полагая толщину тонкого окисла $d = 0,12 \text{ мкм}$. Тогда из (17) получаем удельную емкость тонкого окисла $C_0 \approx 350 \text{ пФ/мм}^2$. При ширине истока и стока 40 мкм и перекрытии 2 мкм получим средние значения $C_{\text{зи}} = C_{\text{зс}} \approx 0,03 \text{ пФ}$. Эти значения меньше, чем значения других емкостей. Поэтому, в частности, емкостью $C_{\text{зи}}$ часто пренебрегают. Однако емкость $C_{\text{зс}}$, представляющая собой емкость обратной связи между выходом транзистора (стоком) и входом (затвором), проявляется во многих схемах не как таковая, а в виде гораздо большей эквивалентной емкости $K C_{\text{зс}}$ (благодаря так называемому эффекту Миллера). Множитель K есть коэффициент усиления схемы: он может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков и более. Поэтому эквивалентная емкость обратной связи $K C_{\text{зс}}$ может достигать значений 0,1-0,5 пФ, т.е. превышать все остальные емкости.

В комплементарных МОП-транзисторных ИС (КМОП) на одном и том же кристалле необходимо изготавливать транзисторы обоих типов: с n - и с p -каналом. При этом один из типов транзисторов нужно размещать в специальном кармане. Например, если в качестве подложки используется p -кремний, то n -канальный транзистор можно осуществить непосредственно в подложке, а для p -канального транзистора потребуется карман с электронной проводимостью (рис. 58, а). Получение такого кармана в принципе несложно, но связано с дополнительными технологическими операциями (фотолитография, диффузия доноров и др.). Кроме того, затрудняется получение низкоомных p^+ -слоев в верхней (сильно легированной) части n -кармана. Другим способом изготовления КМОП-транзисторов на одной подложке является КНС технология. В этом случае на сапфировой подложке создаются «островки» кремния с собственной проводимостью, после чего в одних «островках» проводится диффузия донорной примеси и получаются n -канальные транзисторы, а в других – диффузия акцепторной примеси и получаются p -канальные

транзисторы (рис. 58, б). Хотя количество технологических операций и в этом случае больше, чем при изготовлении транзисторов одного типа, зато отпадают трудности, связанные с получением низкоомных слоев истока и стока (см. выше).

Что касается сочетания МОП-транзисторов с биполярными, то в принципе оно осуществляется просто (рис. 59): *n*-канальные транзисторы изготавливаются непосредственно в *p*-подложке на этапе эмиттерной диффузии, а *p*-канальные – в изолирующих карманах на этапе базовой диффузии.

В процессе развития микроэлектроники усовершенствование МОП-транзисторов происходило по двум главным направлениям: повышение быстродействия и снижение порогового напряжения. В основе последней тенденции лежало стремление снизить рабочие напряжения МОП-транзисторов и рассеиваемую ими мощность. Поскольку полная мощность кристалла ограничена, уменьшение мощности, рассеиваемой в одном транзисторе, способствует повышению степени интеграции, а уменьшение напряжений питания облегчает совместную работу МОП-транзисторных и низковольтных биполярных ИС без специальных согласующих элементов.

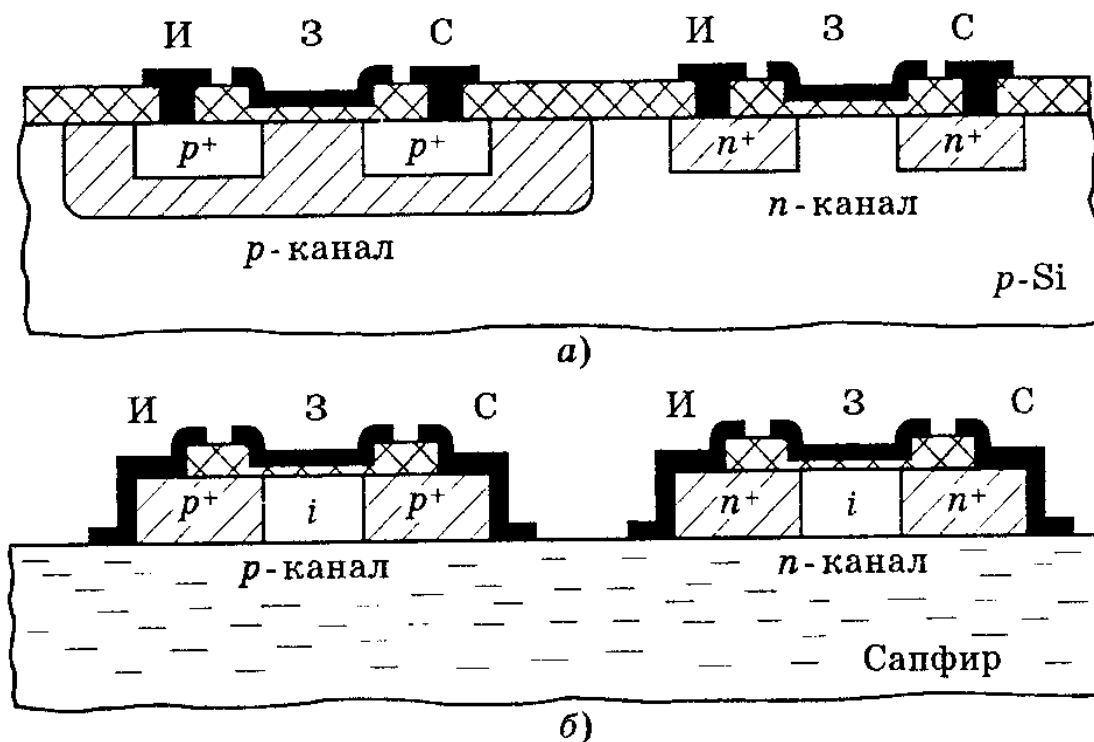


Рис. 58. Комплементарные МОП-транзисторы: *а* – использование изолирующего *n*-кармана; *б* – использование воздушной изоляции (технология КНС)

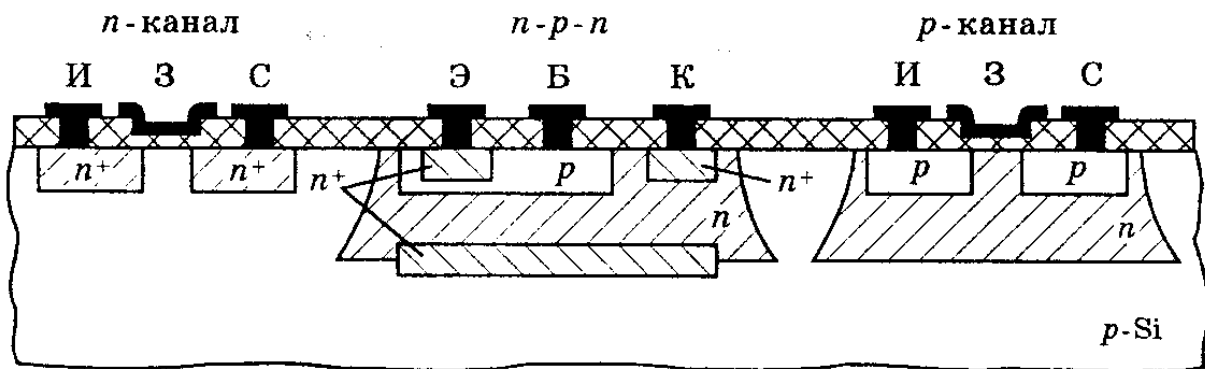


Рис. 59. Сочетание биполярных и МОП-транзисторов на одном кристалле

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Повышение быстродействия МОП-транзисторов связано прежде всего с уменьшением емкостей перекрытия. Существенное (примерно на порядок) уменьшение емкостей перекрытия достигается при использовании технологии самосовмещенных затворов. Общая идея такой технологии состоит в том, что слои истока и стока осуществляются не до, а после осуществления затвора. При этом затвор используется в качестве маски при получении слоев истока и стока, а значит, края затвора и этих слоев будут совпадать и перекрытие будет отсутствовать.

Один из вариантов МОП-транзистора с самосовмещенным затвором показан на рис. 60. Последовательность технологических операций при этом следующая. Сначала проводится диффузия n^+ -слоев, причем расстояние между ними делается заведомо больше желательной длины канала. Затем осуществляется тонкое окисление на участке между n^+ -слоями и частично над ними. Далее на тонкий окисел напыляется алюминиевый электрод затвора, причем его ширина меньше расстояния

между n^+ -слоями. Наконец, проводится ионное легирование (имплантация атомов фосфора) через маску, образуемую алюминиевым затвором и толстым защитным окислом. Атомы фосфора проникают в кремний через тонкий окисел и «продлевают» n^+ -слои до края алюминиевой полоски так, что края затвора практически совпадают с краями истока и стока. Имплантированные слои легированы несколько слабее, чем диффузионные; поэтому для них использовано обозначение n вместо n^+ . Глубина имплантации также несколько меньше, чем глубина диффузии, и составляет 0,1-0,2 мкм.

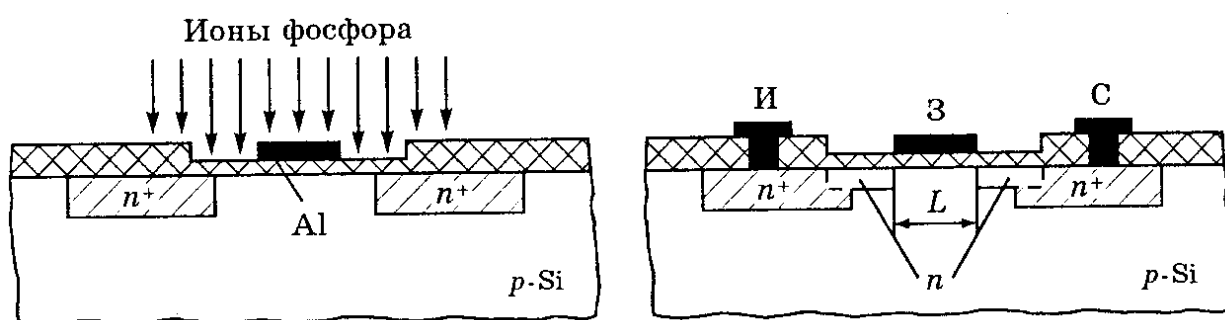


Рис. 60. МОП-транзистор с самосовмещенным затвором, полученный методом ионной имплантации

Другой вариант МОП-транзистора с самосовмещенным затвором показан на рис. 61. В этом варианте сначала вытравливают окно в окисле с размерами, соответствующими всей структуре транзистора. Затем в средней части окна проводят тонкое окисление кремния в виде полоски, ширина которой равна длине будущего канала L . Далее на эту полоску напыляют поликристаллический слой кремния той же ширины, но более длинный, выходящий за границы исходного окна в окисле (рис. 61, а). Удельное сопротивление напыляемого кремния делается достаточно малым, так что слой поликристаллического кремния выполняет роль металлического затвора в обычных МОП-транзисторах. На следующем этапе проводят мелкую диффузию донорной примеси через маску, образуемую полоской поликристаллического кремниевого затвора и защитным окислом, окружающим окно; в результате получают n^+ -слои истока и стока, края которых почти совпадают с краями кремниевого

затвора. Далее всю поверхность кристалла окисляют и в этом окисле, как обычно, делают окна для омических контактов, в том числе для контакта с кремниевым затвором. В заключение осуществляют металлическую разводку. Из рис. 61, б видно, что поликристаллический кремниевый затвор оказывается «погруженным» в слой защитного окисла; омический контакт к нему располагается за пределами рабочей области транзистора.

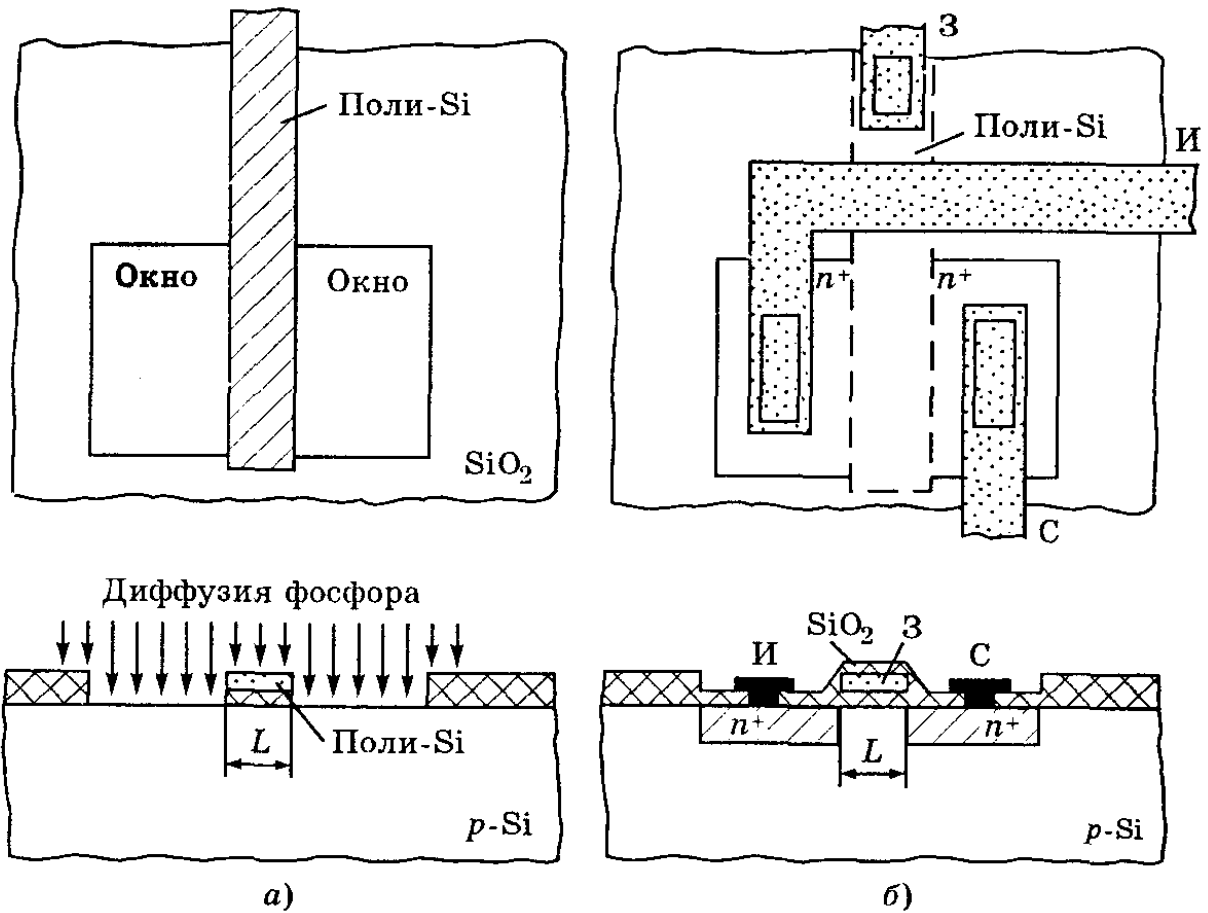


Рис. 61. МОП-транзистор с самосовмещенным поликремниевым затвором:

а – этап диффузии доноров через маску, включающую слой поликристаллического кремния; *б* – готовая структура (после нанесения защитного окисла и металлизации)

Уменьшение паразитных емкостей МОП-транзисторов и прежде всего емкости перекрытия $C_{зс}$ выдвигает на первый план задачу

уменьшения постоянной времени крутизны τ_s . При малых емкостях она становится главным фактором, ограничивающим быстродействие.

Переход от транзисторов с p -каналом к транзисторам с n -каналом позволил уменьшить значение τ_s примерно в 3 раза благодаря увеличению подвижности носителей. Дальнейшее уменьшение величины τ_s требует уменьшения длины канала L . Этот путь наиболее радикально реализуется методом двойной диффузии. Структура МОП-транзистора, полученная этим методом, показана на рис. 62.

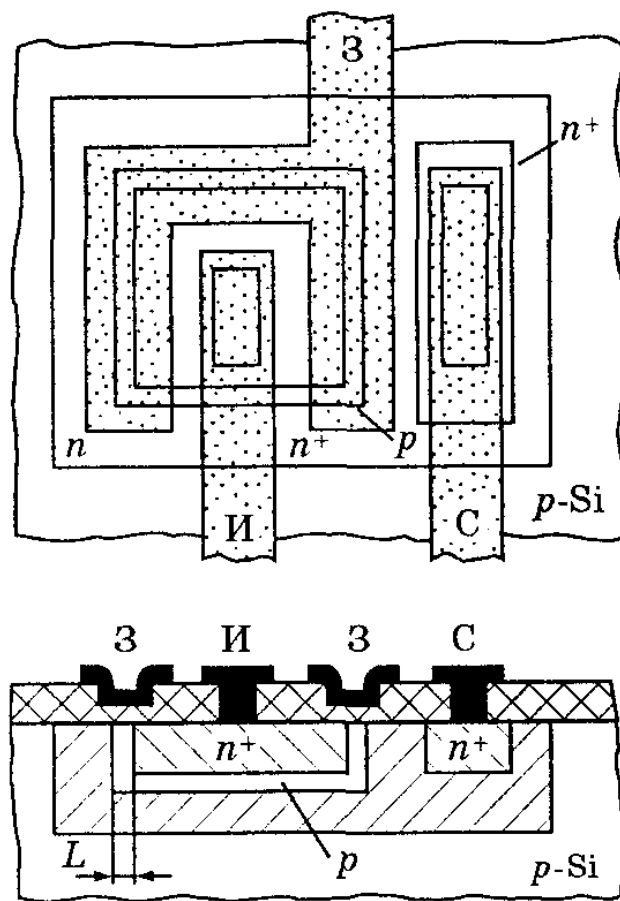


Рис. 62. МОП-транзистор, полученный методом двойной диффузии

Эта структура аналогична структуре классического n - p - n -транзистора (рис. 64, а) с той, однако, существенной разницей, что эмиттерный n^+ -слой (в данном случае это слой истока) имеет почти такую

же площадь, что и базовый p -слой (в данном случае это слой канала). Для того, чтобы обеспечить точное «вписывание» n^+ -слоя в p -слой, диффузию доноров для n^+ -слоя осуществляют через то же самое окно в окисле, через которое до этого осуществляли диффузию акцепторов для p -слоя. Тем самым устраняется необходимость в совмещении фотошаблонов для двух последовательных фотолитографий, а значит, и ошибка совмещения, которая могла бы привести к сдвигу n^+ -слоя относительно n -слоя. В результате расстояние между n^+ - и n -слоями, т.е. толщина p -слоя, может иметь примерно те же значения, что и ширина базы w у n - p - n -транзистора (рис. 64, а): до 1 мкм и менее.

Вблизи поверхности расстояние между n^+ - и n -слоями играет роль длины канала L (рис. 7.32). При значениях $L < 1$ мкм (вместо 4-5 мкм у наиболее совершенных МОП-транзисторов, полученных по обычной технологии) постоянная времени τ_s может быть менее 0,005 нс, а граничная частота f_s более 30 ГГц.

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Транзисторы со структурой, показанной на рис. 61, обычно называют МОП-транзисторами с кремниевым затвором. Такие транзисторы характерны не только малой емкостью перекрытия, но и малым пороговым напряжением: 1-2 В вместо обычных 2,5-3,5 В. Это объясняется тем, что материал затвора и подложки – один и тот же – кремний. Следовательно, контактная разность потенциалов между ними (ϕ_{ms}) равна нулю, что и приводит к уменьшению порогового напряжения. Примерно такой же результат дает использование молибденового затвора.

Помимо контактной разности потенциалов, для уменьшения порогового напряжения можно варьировать и другими параметрами. Например, можно заменить тонкий окисел SiO_2 тонким напыленным слоем нитрида кремния Si_3N_4 , у которого диэлектрическая проницаемость ($\epsilon = 7$) примерно в полтора раза больше, чем у двуокиси кремния ($\epsilon = 4,5$). Это приводит к увеличению удельной емкости C_0 , а значит к уменьшению соответствующих слагаемых порогового напряжения. Нитрид кремния в качестве подзатворного диэлектрика обеспечивает также дополнительные

преимущества: меньшие шумы, большую временную стабильность ВАХ и повышенную радиационную стойкость МДП-транзистора.

Можно вместо пластин кремния с традиционной кристаллографической ориентацией (111) использовать пластины с ориентацией (100). При этом увеличивается плотность поверхностных состояний, а вместе с нею и заряд захватываемых ими электронов. Соответственно возрастает отрицательное слагаемое Q_{0s}/C_0 , а алгебраическая сумма обоих слагаемых, т.е. напряжение U_{0F} , уменьшается.

Обратное влияние оказывает введение в тонкий окисел акцепторных атомов: они захватывают из приповерхностного слоя кремния часть электронов, порожденных донорными примесями, которые всегда присутствуют в окисле. В результате заряд Q_{0s} уменьшается. Введение акцепторов в окисел можно осуществлять с помощью ионной имплантации.

Сочетая перечисленные методы, можно обеспечить пороговые напряжения практически любой сколь угодно малой величины. Следует, однако, иметь в виду, что слишком малые значения порогового напряжения (0,5-1 В и менее) в большинстве случаев неприемлемы по схемотехническим соображениям (малая помехоустойчивость).

МНОП-ТРАНЗИСТОР

Особое место среди МДП-транзисторов занимает так называемый МНОП-транзистор, у которого диэлектрик имеет структуру «сэндвича», состоящего из слоев нитрида и окисла кремния (рис. 63, *a*). Слой окисла получается путем термического окисления и имеет толщину 2-5 нм, а слой нитрида – путем реактивного напыления и имеет толщину 0,05-0,1 мкм, достаточную для того, чтобы пробивное напряжение превышало 50-70 В.

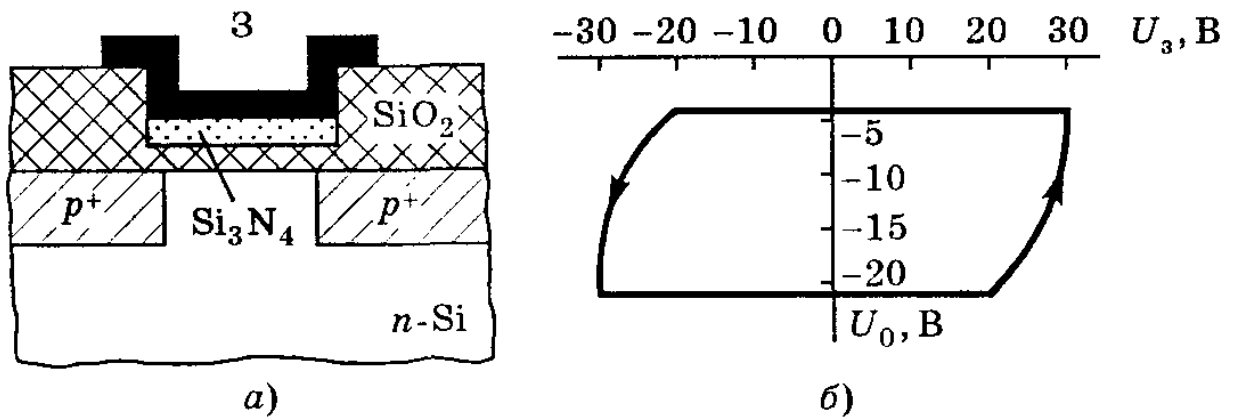


Рис. 63. МОП-транзистор с индуцированным p -каналом: a – структура; b – зависимость порогового напряжения от напряжения затвора

Главная особенность МНОП-транзистора состоит в том, что его пороговое напряжение можно менять, подавая на затвор короткие (100 мкс) импульсы напряжения разной полярности, с большой амплитудой (30-50 В). Так, при подаче импульса +30 В устанавливается пороговое напряжение $U_0 = -4$ В (рис. 63, б). Это значение сохраняется при дальнейшем использовании транзистора в режиме малых сигналов ($U_3 \leq \pm 10$ В); в таком режиме МНОП-транзистор ведет себя как обычный МДП-транзистор с индуцированным каналом. Если теперь подать импульс -30 В, то пороговое напряжение делается равным $U_0 = -20$ В и, следовательно, сигналы $U_3 < \pm 10$ В не смогут вывести транзистор из запертого состояния. Как видим, благодаря гистерезисной зависимости $U_0(U_3)$ МНОП-транзистор можно с помощью больших управляющих импульсов переводить из рабочего в запертое состояние и обратно. Эта возможность используется в интегральных запоминающих устройствах.

В основе работы МНОП-транзистора лежит накопление заряда на границе нитридного и оксидного слоев. Это накопление есть результат неодинаковых токов проводимости в том и другом слоях. Процесс накопления описывается элементарным выражением

$$dQ/dt = I_{\text{SiO}_2} - I_{\text{Si}_3\text{N}_4}, \quad (18)$$

где оба тока зависят от напряжения на затворе и меняются в процессе накопления заряда. При большом отрицательном напряжении на границе накапливается положительный заряд. Это равносильно введению доноров в диэлектрик и сопровождается увеличением отрицательного порогового напряжения. При большом положительном напряжении U_3 на границе накапливается отрицательный заряд. Это приводит к уменьшению отрицательного порогового напряжения.

При малых напряжениях U_3 токи в диэлектрических слоях уменьшаются на 10-15 порядков (!), так что накопленный заряд сохраняется в течение тысяч часов. Вместе с ним сохраняется и пороговое напряжение.