

Моделирование совмещенных МОП-приборов с нанометровыми размерами

В. В. Ракитин

ФГУП НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина, rakitin@niifp.ru

Аннотация – В статье рассмотрен новый тип приборов с нанометровыми размерами – совмещенный МОП-транзистор (СМОП). Описана конструкция и принцип его работы. Проведено моделирование СМОП с минимальным топологическим размером 10 нм. Результаты моделирования показывают, что простейший СМОП работает при напряжении питания 0,6 В и ниже, имеет коэффициент усиления по напряжению выше 10, работоспособен в гигагерцовом диапазоне. Продемонстрирована возможность выполнения на СМОП сложных логических функций.

Ключевые слова – МОП-транзистор, СМОП-транзистор, логический вентиль, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Среди многообразия конструкций МОП-транзисторов с нанометровыми размерами многообещающими являются приборы, у которых канал окружен затвором. К ним относятся многозатворные транзисторы и транзисторы с кольцевым затвором [1]-[3]. У них снижены короткоканальные эффекты, выше плотность тока, лучшая подпороговая характеристика. Переход к вертикальным структурам (например, МОП на нанопроволоке с кольцевым затвором) снижает занимаемую прибором площадь [4]-[5]. Однако объединение подобных приборов в схемы (например, логические вентиля) ведет к определенным конструктивно-технологическим трудностям. Часть из них удастся преодолеть при переходе к совмещенным МОП-транзисторам (СМОП) [6]. Целью данной работы является моделирование работы элементов на СМОП с нанометровыми размерами.

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ СМОП

Совмещенные приборы достаточно хорошо известны, и некоторые из них широко распространены. Так четырехслойный p-n-p-n прибор (тиристор) можно рассматривать как совмещение n-p-n биполярного транзистора с p-n-p транзистором.

Основная идея СМОП заключается в совмещении активных областей n-канального и p-канального МОП-транзисторов. При этом у них будут общими затворы и подзатворные области (каналы). Последнее имеет смысл, если проводимость активной области близка к собственной проводимости кремния. Отметим, что переход к нелегированным каналам является общей тенденцией в нанометровых МОП-транзисторах.

В составе СМОП, естественно, должны быть источник подвижных носителей обоих знаков (электронов и дырок) – совмещенный исток, и их приемник – совмещенный сток, который должен беспрепятственно поглощать оба типа носителей, рис. 1.

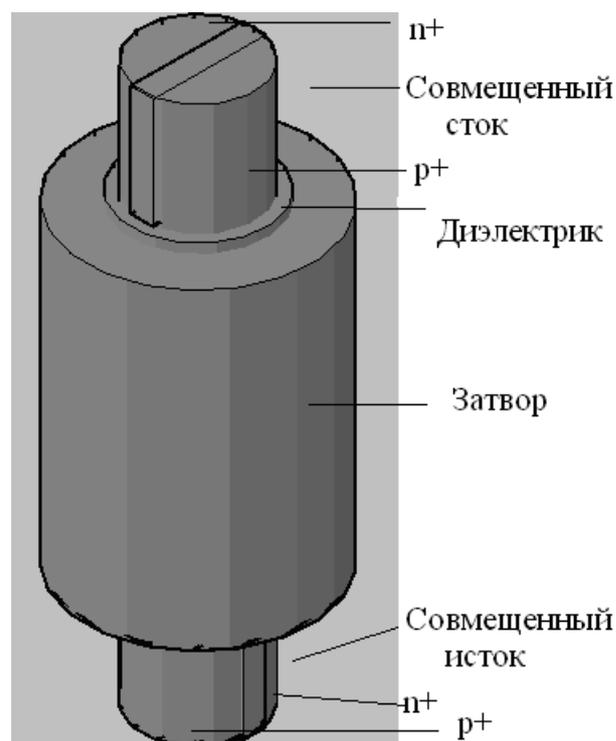


Рис. 1. СМОП с кольцевым затвором

В простейшем (но не единственном) случае в качестве истока может быть использован общий для нескольких СМОП p-n-переход. На него подается небольшое напряжение питания (не более 0,6 В), смещающее его в прямом направлении. При наличии положительной разности потенциалов между p+-истоком и n+-истоком они инжектируют в активную область электроны и дырки, распределение которых определяется потенциалом на затворе. При малых напряжениях питания ток между p+-истоком и n+-истоком невелик в силу экспоненциальной зависимости от напряжения питания.

Плотность подвижных носителей в канале сильно зависит от напряжения на затворе. При положительном напряжении на затворе по отношению к каналу в канале преобладают электроны, а при отрицательном – дырки.

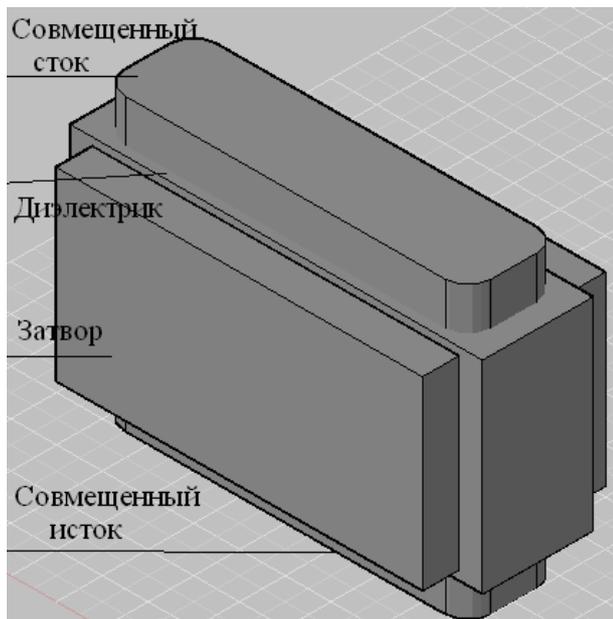


Рис. 2. Двухзатворный СМОП

Фактически в составе СМОП имеется два МОП-транзистора (виртуальных): n-канальный и p-канальный, а сам СМОП является вентиляем (усилителем), у которого затвор – входной электрод, а общий сток – выходной электрод. Если входные напряжения близки к нулевым, выше проводимость p-канального транзистора, а если они близки к напряжению питания, выше проводимость n-канального транзистора.

При нелегированной активной области с фоновой концентрацией легирующих примесей не более $10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3}$ электрические параметры МОП-транзисторов могут варьироваться в широких пределах выбором материала затвора. Когда использован материал со среднезонной работой выхода, напряжение плоских зон близко к нулю, а пороговые напряжения виртуальных n-канального и p-канального транзисторов одинаковы. Тогда при низком (нулевом) потенциале на затворе в канале присутствуют дырки, а при высоком потенциале, равном напряжению питания, – электроны. Соответственно, на стоке устанавливается напряжение высокое или нулевое. Таким образом, при подаче на затвор входного двоичного сигнала на стоке появляется проинвертированный сигнал, т. е. простейший СМОП работает как инвертор.

СМОП могут использоваться как в линейных, так и в цифровых устройствах. Реализация сложных логических функций достигается за счет сложения потенциалов на затворе, токов в объединенных стоках или в многозатворных конфигурациях.

СМОП допускает большое разнообразие конструктивных исполнений: планарное и трехмерное, с вертикальным каналом и горизонтальным, с одним затвором и с несколькими, с p-n-переходами и с диодами Шоттки. СМОП с кольцевым затвором может быть выполнен на нанопроволоке. Его активная область занимает минимальную площадь – один топологический квадрат, а весь прибор – четыре квадрата. Плотность таких приборов максимальна и сравнима с плотностью динамических элементов памяти.

Другим вариантом является двухзатворный СМОП, рис. 2, имеющий форму вытянутого параллелепипеда.

Наличие двух затворов облегчает построение логических вентиляей. Кроме того, подобная конструкция позволяет достигать большей плотности тока на единицу площади.

III. МОДЕЛЬ НАНОМЕТРОВОГО СМОП

Моделирование СМОП с нанометровыми размерами выполнялось с помощью программы DESSIS пакета ISE TCAD.

Основной вариант исследуемого прибора изображен на рис. 3. Фактически это сечение двухзатворного СМОП, где совмещенными стоками и истоками служат p-n-переходы.

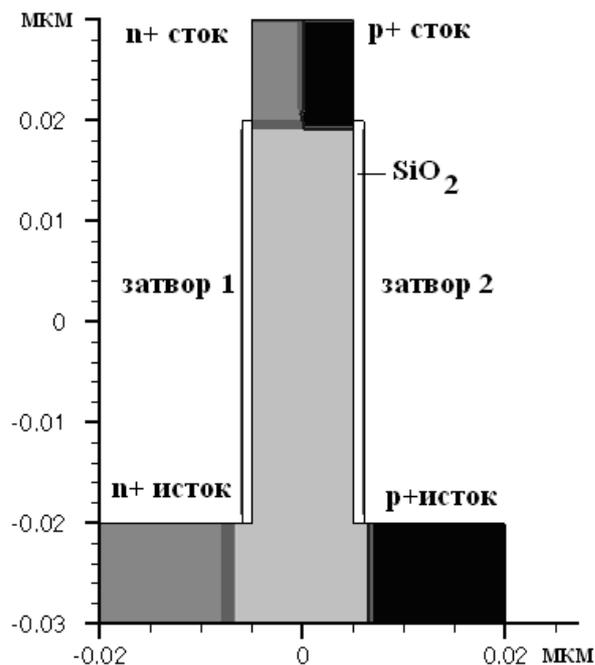


Рис. 3. Модель СМОП с p-n-переходами

На рис. 3 изображена вертикальная конструкция, однако результаты справедливы и для горизонтальных СМОП. Толщина тела транзистора варьировалась в диапазоне 10-20 нм, длина затворов – 40-100 нм, эффективная толщина диэлектрика (оксида кремния) – 1-2 нм. Ширина тела транзистора составляла 1 мкм. Концентрация фоновой примеси в

теле принималась равной $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Учитывалась рекомбинация носителей по механизму Шокли-Рида-Хола со временем жизни неосновных носителей заряда 10 нс и со скоростью поверхностной рекомбинации 10^3 см/с . Указанные значения являются типичными для обычных интегральных приборов и приняты в DESSIS по умолчанию. В качестве стоков/истоков использовались как высоколегированные области, так и контакты Шоттки. В первом случае в качестве легирующих примесей использовались мышьяк (n+-область) и бор (p+-область), с концентрацией $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для каждого типа примеси. Во втором случае контакт Шоттки задавался работой выхода металла. Стоки объединялись друг с другом в совмещенный сток непосредственно за счет перекрытия высоколегированных областей или с помощью проводящей связи. Истоки были разнесены на ширину тела транзистора, а совмещенным истоком служила область между ними. В качестве материалов затвора рассматривался металл со среднечастотной работой выхода, равной 4,65 эВ.

При моделировании простейшего инвертирующего СМОП-усилителя затворы объединялись. В других случаях они управлялись независимо или в соответствии со схемой соединения. Для анализа более сложных элементов вводились дополнительные затворы. Моделировались основные статические характеристики, рассчитывались малосигнальные параметры, анализировались переходные процессы.

В нижеприведенных результатах геометрические размеры СМОП были такими, как на рис. 3.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Входная характеристика простейшего СМОП-транзистора – зависимость тока стока от напряжения на затворе при фиксированном напряжении на стоке (0,3 В) – приведена на рис. 4.

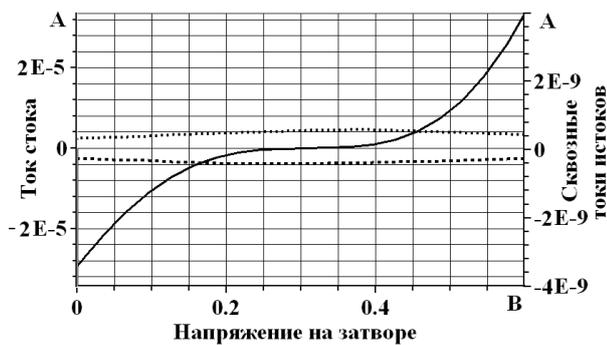


Рис. 4. Входная характеристика СМОП

Она отличается от характеристик обычных МОП тем, что ток меняет свое направление в зависимости от напряжения на затворе. При напряжениях, больших половины напряжения питания, ток втекает в прибор, а при меньших – вытекает из него. Из рис. 4 следует, что наряду с током стока протекает сквозной ток между n+-истоком и p+-истоком, величина которого на несколько порядков ниже тока стока.

Семейство выходных характеристик СМОП (построенное с шагом по напряжению на затворе, равным 0,1 В) является суперпозицией ВАХ n-канального и p-канального транзисторов, рис. 5. Близость значений положительных и отрицательных токов достигается подбором работы выхода металла затвора.

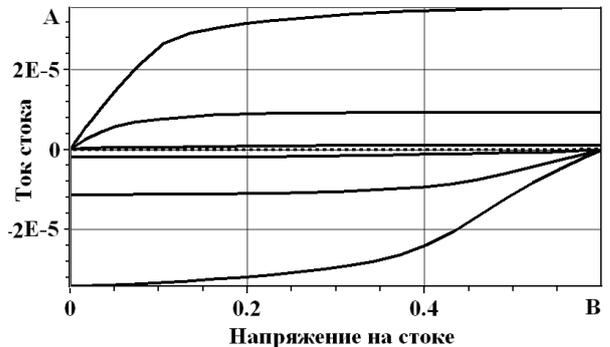


Рис. 5. Выходная характеристика СМОП

На рис. 4 и рис. 5 представлены характеристики симметричных СМОП-двухзатворных транзисторов с одинаковыми затворами. За счет введения асимметрии можно значительно увеличить выходные токи приборов. Это достигается, например, использованием для затворов металлов с различной работой выхода.

Передаточная характеристика симметричного СМОП, рис. 6, позволяет оценить коэффициент усиления по напряжению. В данном случае он превышает 10.

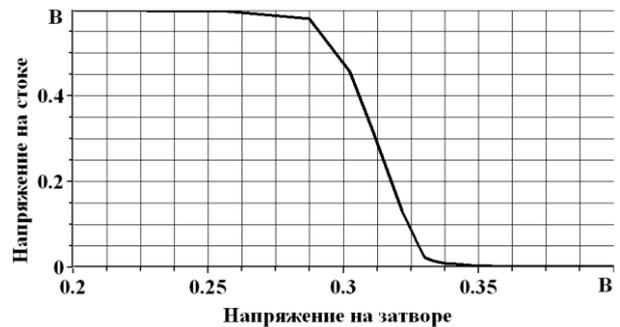


Рис. 6. Передаточная характеристика СМОП

Коэффициент усиления СМОП при необходимости может быть значительно увеличен различными конструктивными способами.

Одним из эффективных вариантов является применение каскадного включения. В таком случае на столбике располагается дополнительный затвор (затворы). Как показало моделирование, коэффициент усиления по напряжению у каскадного СМОП повышается на порядок и достигает 100.

Из проведенного анализа, подтвержденного моделированием, следует, что СМОП работает в подпороговом режиме с небольшим усилением тока (по сравнению с обычным МОП) за счет постоянно от-

крытого p-n-перехода совмещенного истока – транзисторный эффект.

Работоспособность СМОП сохраняется и при более низких напряжениях питания [6], вплоть до одной десятой В. Однако при этом неизбежно снижение рабочих токов и, как следствие, падение быстродействия. В такой ситуации целесообразен переход к несимметричным СМОП (н-СМОП).

В н-СМОП в качестве затворов использовались металлы с различной работой выхода: от среднезонных (с работой выхода 4,65 эВ) до металлов с работой выхода, примерно равной дну зоны проводимости кремния и вершине валентной зоны – 5,2 эВ и 4,1 эВ, соответственно. Было проведено исследование влияния работы выхода затворов и выбран подходящий вариант н-СМОП (работа выхода материала затвора 1 и затвора 2 – 5,0 В и 4,3 В, соответственно). Результаты моделирования его выходных характеристик при напряжениях питания 0,6 В (точечная линия) и при пониженных напряжениях питания 0,4-0,1 В приведены на рис. 7 (изображена только часть шкалы напряжения). Напряжение на стоке изменяется только до напряжения питания, а входное напряжение равняется напряжению питания.

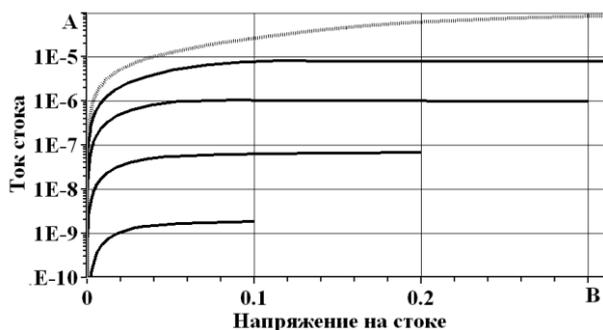


Рис. 7. Выходные характеристики н-СМОП

Как следует из сравнения рис. 3 и рис. 7, ток СМОП с питанием 0,6 В при введении указанной асимметрии вырос более, чем в 2,5 раза. При снижении напряжения питания происходит гораздо более быстрое (почти экспоненциальное падение) рабочих токов. Следует отметить возрастание сквозных токов истоков у н-СМОП при увеличении разности работ выхода материала затворов, что обусловлено появлением встроенных каналов на столбике.

Передачные характеристики того же н-СМОП при напряжениях питания 0,4-0,1 В приведены на рис. 8. Из них следует возможность использования н-СМОП в аналоговых и цифровых схемах при значительном снижении напряжения питания, вплоть до 0,2 В. Сильное ухудшение усилительных свойств н-СМОП при напряжении питания меньше 0,1 В коррелирует с существованием значительных сквозных токов.

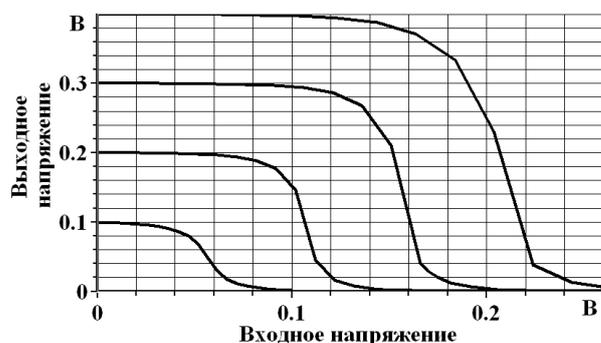


Рис. 8. Передаточные характеристики н-СМОП

Был выполнен комплекс моделирования малосигнальных параметров: матриц проводимостей (А) и матриц емкостей (С) симметричных СМОП и их зависимости от режимов и частоты. Анализ показал, что СМОП допускают использование в качестве аналоговых элементов в широком диапазоне рабочих частот.

Типичные значения взаимных проводимостей (в мкА/В) и емкостей (в фФ) для электродов стока (d), затвора (g), p+-истока (s) и n+-истока (b) (рассчитанные при напряжении на стоке и затворе 0,3 В) приведены в табл.1

Таблица 1

Малосигнальные параметры СМОП

Add	0,25	Cdd	0,07
Adg	3,97	Cdg	0,07
Ads	2,99	Cds	0,02
Adb	1,23	Cdb	0,003
Agd	0	Cgd	0,07
Agg	0	Cgg	0,196
Ags	0	Cgs	~ 0
Agb	0	Cgb	~ 0

Зависимость основных параметров симметричного СМОП от частоты приведена на рис. 9.

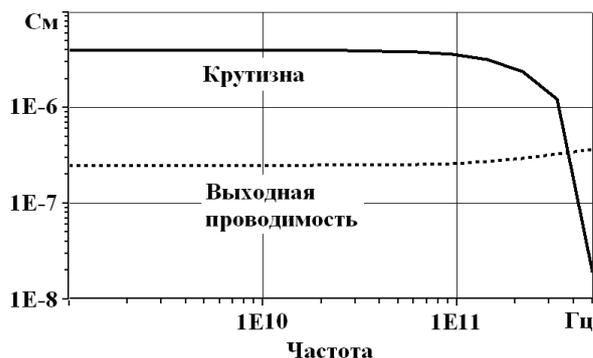


Рис. 9. Частотная характеристика СМОП

Из рис. 9 следует, что крутизна СМОП и его выходная проводимость сохраняются вплоть до частоты 100 ГГц. Частота единичного усиления симметричного СМОП определяется отношением крутизны

к емкости затвора (Adg/Cgg) и превышает 3 ГГц. Она может быть значительно повышена при переходе к н-СМОП.

Динамические характеристики СМОП в режиме большого сигнала моделировались при внешней нагрузке порядка 1 фФ. В таких условиях СМОП удовлетворительно передает импульсную последовательность с частотой до 10 ГГц, рис. 10. Задержка переключения СМОП не превышает 20 пс и линейно возрастает при увеличении емкости нагрузки.

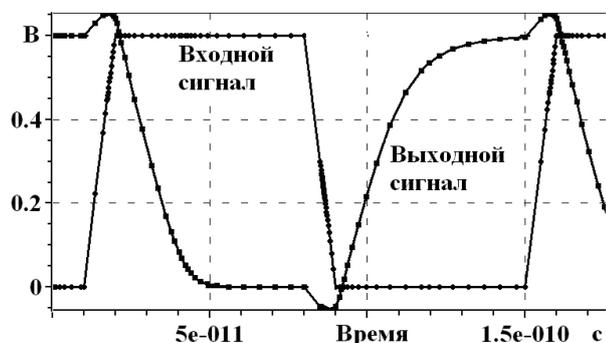


Рис. 10. Переходные процессы в СМОП

Полагаем, что логические вентили на СМОП (с коэффициентом размножения 3-5) обеспечат работу цифровых устройств на тактовых частотах до нескольких ГГц. При работе на большие емкостные нагрузки и длинные линии потребуются использование специальных драйверов, например, на основе н-СМОП.

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Для построения произвольных логических функций на основе СМОП возможны различные подходы, в том числе многозатворные СМОП, представленные на рис. 11.

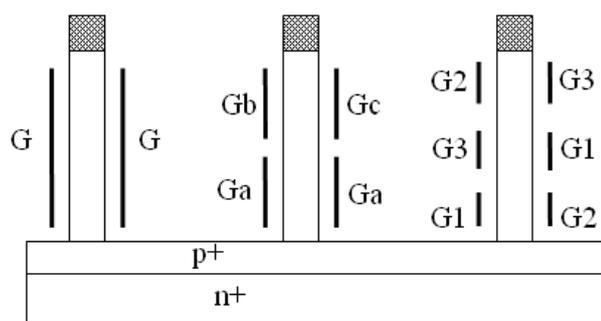


Рис. 11. Многозатворные СМОП

На данном рисунке изображены вертикальные СМОП с разным количеством слоев затворов. Заметим, что формирование затворов достигается нанесением тонких слоев металлов на предварительно выращенный диэлектрик. В основании вертикальных столбиков сформирован общий р-п-переход, смещенный в прямом направлении подачей напряжения питания (или освещением). Такой совмещенный исток позволяет получить более плотное размещение

элементов. На вершинах вертикальных столбиков сформированы общие стоки. Это могут быть р-п-переходы, парные контакты Шоттки и даже одиночный контакт Шоттки со среднечастотной работой выхода. Правда, в последнем случае, как показало моделирование, коэффициент усиления (наклон передаточной характеристики) уменьшается.

В простейшем (рассмотренном выше) случае у столбика один слой затворов, и на оба затвора подается один и тот же сигнал. Такой однослойный СМОП всегда находится в проводящем состоянии, хотя ток через него может и отсутствовать. Это обусловлено тем, что в его канале постоянно присутствуют носители одного или обоих знаков (при нулевом напряжении на затворе – в канале дырки, при напряжении питания – электроны, а при среднем напряжении – и электроны, и дырки).

При раздельном управлении затворами ситуация усложняется, поскольку за счет выбора металла затвора можно сместить пороговое напряжение и нарушить баланс токов электронного и дырочного каналов. Так, при большой работе выхода у металлов обоих затворов электронные токи при положительных входных напряжениях будут больше, чем дырочные токи при нулевых входных напряжениях. При достаточно большой разнице величин токов будет выполняться функция ИЛИ-НЕ. Для выполнения функции И-НЕ необходимо использовать металлы затворов с малой работой выхода. Следует отметить, что подобное «проводное» выполнение логических функций приводит к значительному потреблению дополнительного тока.

Однослойные н-СМОП, рассмотренные выше, нарушают однородность столбика. При одинаковых сигналах на затворах носители преимущественно сосредотачиваются в определенной части столбика (электроны под затвором с большой работой выхода, а дырки под затвором с малой работой выхода). В некотором смысле н-СМОП напоминает свернутый КМОП-вентиль.

У СМОП с двумя слоями затворов возможности управления носителями в канале значительно расширяются – канал может быть и непроводящим. Действительно, при различных напряжениях на затворах нижнего и верхнего слоев проводимость канала нарушена. В канале слоя с высоким входным напряжением присутствуют электроны, а в канале слоя с низким – дырки. Таким образом, и электроны, и дырки не могут беспрепятственно следовать от истока к стоку. В этом положении потенциал стока определяется предисторией и наличием паразитных токов утечки.

СМОП с двумя слоями затворов позволяет выполнять не только логические функции, но и хранение информации. Так средний столбик, рис. 11, сохраняет потенциал стока (или конденсатора, к нему подсоединенного), если напряжение на нижних затворах G_a и напряжения на верхних затворах G_b и G_c противоположны по знаку.

В н-СМОП с двумя слоями затворов можно добиться выполнения функций ИЛИ-НЕ и И-НЕ без дополнительного потребления тока.

Конфигурация СМОП с двумя слоями затворов позволяет повысить коэффициент усиления по напряжению, поскольку верхние затворы изолируют сток от нижнего управляющего затвора (аналог каскода в линейных схемах).

Введение третьего слоя затворов открывает еще более богатые возможности синтеза цифровых и аналоговых схем на СМОП.

Так появляется возможность реализации двоичного элемента с симметричной логической функцией трех переменных – мажоритарного инвертора. Подсоединяя, как изображено на рис. 11, три входа (G1, G2, G3) к парам затворов каждого из трех слоев, можно обеспечить наличие связи общего истока с общим стоком при любой комбинации входных сигналов. Такой многозатворный СМОП, занимающий минимальную площадь, обладает логической полнотой. На его основе могут быть экономно реализованы различные логические схемы и устройства. С его использованием для построения трехвходового сумматора достаточно пяти СМОП.

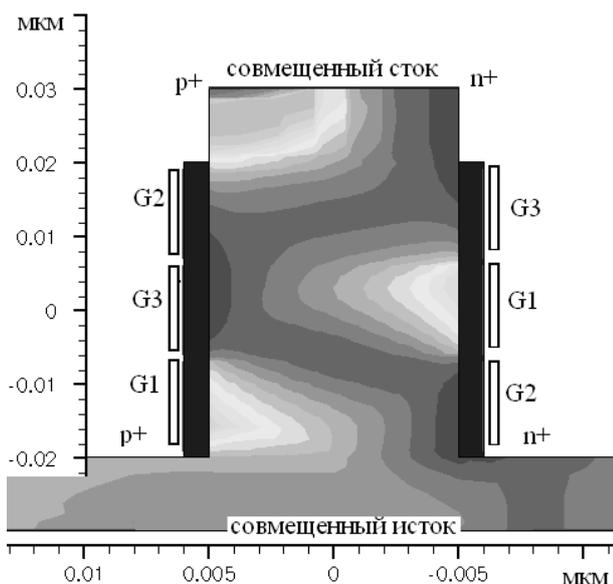


Рис. 12. Распределение токов в мажоритарном инверторе

Моделирование мажоритарного инвертора выполнялось на структуре, аналогичной простейшему СМОП, но с тремя слоями затворов. На рис. 12 в качестве примера показано распределение токов в подобном трехвходовом мажоритарном инверторе при преобладании положительных входных сигналов.

На двух входах (затворы G2 и G3) высокий потенциал (логическая "1"), а на одном (G1) – низкий (логический "0"). В результате ток электронов протекает по сложной траектории из n⁺-истока к

p⁺-стоку, выравнивая их потенциалы и создавая на выходе сигнал низкого уровня. Моделирование показывает, что перестановка входных сигналов по затворам не изменяет ситуацию.

При наличии на входах двух нулевых входных сигналов будут созданы условия протекания тока дырок от p⁺-истока к p⁺-стоку, что приведет к выравниванию их потенциалов, создавая на выходе высокий уровень. При одинаковых входных сигналах поведение мажоритарного инвертора аналогично простому инвертору, но величина тока в канале будет гораздо (на порядок) выше.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование ряда конструкций СМОП показало, что они работоспособны при нанометровых размерах элементов. Проведено моделирование СМОП с минимальным топологическим размером 10 нм. Результаты моделирования свидетельствуют, что простейший СМОП работает при напряжении питания 0,6 В и ниже, имеет коэффициент усиления по напряжению выше 10, работоспособен на гигагерцовых частотах.

Рассмотрены вопросы построения многозатворных СМОП, позволяющих повысить эффективность аналоговых и цифровых устройств.

Показано, что СМОП обладают параметрами, необходимыми для цифровых и аналоговых систем, где основными требованиями являются минимизация размеров при достаточно высоком быстродействии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Doyle B.S., et al. High performance fully depleted trigate CMOS transistors // IEEE Electron Device Lett. 2003. V. 24. № 4. P. 263-265.
- [2] Collinge J.P. Multiple gate SOI MOSFET // SolidState Electron. 2004. V. 48. № 6. P. 897-905.
- [3] Hiramoto T., et al. Emerging nanoscale silicon devices taking advantage of nanostructure physics // IBM J. Res. & Dev. 2006. V. 50. № 4/5. P. 411-418.
- [4] Appenzeller J., et al. Toward Nanowire Electronics // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. V. 55. № 11. P. 2827-2845.
- [5] Lu W., et al. Nanowire Transistor Performance Limits and Applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. V. 55. № 11. P. 2859-2876.
- [6] Ракидин В.В. Совмещенные транзисторы // Электронная промышленность. 2004. № . С. 59-63.
- [7] Ракидин В. В., Филиппов Е. И. Субмикронные элементы на совмещенных МОП-транзисторах // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 4. С. 316-320.