

19. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.—М.: Наука, 1978.
20. Maeda K., Umezumi I. Atomic microstructure and electronic properties of α -SiN_x:H deposited by PECVD // J. Non-Cryst. Sol.—1991.—137 & 138.—P. 883.
21. Assal R., Bayliss S. C., Davis E. A. Semiconductor to metal transitions induced by pressure in the amorphous alloy system α -Si_{1-x}N_x:H // Ibid.—P. 931.
22. Oversluizen G., Van Kessel R. P., Nienwesteeg K. J., Boogaard J. The Meyer — Neldel rule in hydrogenated amorphous silicon thin devices // J. Appl. Phys.—1991.—69, N 5.—P. 3082.

Поступила в редакцию 23 июня 1992 г.

УДК 621.315

А. Г. Богданов, В. И. Кольдяев, В. Е. Малак, И. Г. Неизвестный
(Новосибирск)

МЕТОД МИНИАТЮРИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ КМДП СБИС

Обсуждены проблемы практической миниатюризации элементной базы КМДП СБИС. Кратко рассмотрены известные методы масштабирования МДП-транзисторов. Описан метод миниатюризации элементной базы КМДП СБИС, включающий процедуры масштабирования и систему сквозного моделирования элементов и технологии изготовления СБИС для оптимизации элементов. Метод основан на представлении о совокупной элементной базе СБИС и позволяет использовать новые идеи в конструировании элементов. Показано, что при уменьшении проектной нормы менее 1 мкм требуется использование новых принципов создания затвора p -канального МДП-транзистора. Предложена обобщенная конструкция МДПТ. Получены практические результаты миниатюризации элементной базы КМДП СБИС в диапазоне проектных норм от 2 до 0,7 мкм.

Введение. Проблема расширения функциональных возможностей СБИС в пределах одного кристалла является одной из самых актуальных при создании интегральных схем. Прогресс в этой области для СБИС достигается в основном за счет роста уровня интеграции, а также увеличения размеров кристалла. По мере развития технологии высокий уровень интеграции реализуется через уменьшение минимальных проектных норм — минимальных размеров элементов СБИС, т. е. миниатюризацию элементов. Задача миниатюризации элементов КМДП СБИС, таких как n - или p -канальные МДП-транзисторы (n -МДПТ и p -МДПТ), имеет два аспекта: а) миниатюризация размеров МДПТ с целью определения физического предела осуществимости идеи транзистора на полевом эффекте [1]; б) миниатюризация практических конструкций МДПТ с целью выявления физического предела данных конструкторского и технологического подходов изготовления и определения практических шагов продвижения к физическому пределу [2—4]. Данная работа посвящена второму аспекту задачи, для решения которой разработан метод миниатюризации элементной базы (ЭБ) КМДП СБИС.

Задача миниатюризации элементов СБИС решалась до сих пор главным образом с помощью методик масштабирования [2, 3, 5], на основе которых предсказываются совокупности параметров элементов для заданной проектной нормы как некоторые пропорциональные соотношения к совокупности параметров элементов с исходной проектной нормой. Имеются CV -, CE -, QCV -, G -методики масштабирования [2—5]: при CV -масштабировании все параметры изменяются в K раз, а напряжение питания V_p остается постоянным; при CE — все параметры, и в том числе V_p , изменяются в K раз; при QCV — все параметры масштабируются в K раз, а V_p уменьшается в $(K)^{1/2}$ раз; при G — все параметры изменяются в k раз, а V_p в Q раз. Наконец, имеется методика масштабирования из [6], называемая далее BFNS по первым буквам авторов. Согласно BFNS-методике, сохраняется величина $d \lg I_{ds} / d V_{gs}$ для подпорогового тока I_{ds} МДПТ в зависимости от напряжения затвор-исток V_{gs} при таком изме-

нении параметров конструкции МДПТ, что они удовлетворяют соотношению, найденному в [6]:

$$L_{\min} = A [X_j t_{ax} (W_s + W_d)^2]^{1/3}, \quad (1)$$

где $A = 0,41(\text{Å})^{1/3}$ — константа, X_j — глубина p - n -перехода истока-стока, t_{ax} — толщина диэлектрика под затвором, $W_x = \{W_s, W_d\}$ — толщины ОПЗ на p - n -переходах стока и истока:

$$W_x = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_s / (qN_a)} (aV_{ds} + V_{bi} + V_{bs}).$$

Здесь для $W_x = W_s$ $a = 0$, а для $W_x = W_d$ $a = 1$; N_a — концентрация легирования подложки; V_{ds} и V_{bs} — напряжения на стоке и подложке относительно истока; V_{bi} — контактная разность потенциалов p - n -переходов сток-исток — подложка; $\epsilon_0\epsilon_s$ — диэлектрическая проницаемость полупроводника; kT — тепловой потенциал; q — заряд электрона. При длине канала $L > L_{\min}$ соотношение (1) гарантирует идентичность подпороговых характеристик МДПТ при любых комбинациях X_j , t_{ax} , N_a , $V_{ds} = V_p$, удовлетворяющих уравнению (1). Однако результат процедуры простого масштабирования, как правило, не удовлетворяет требованиям оптимальности конструкции и пресметственности технологии изготовления и поэтому требует эвристической коррекции параметров транзисторов [4—6]. Кроме того, технологические ограничения иногда вообще не позволяют получить в результате масштабирования практическую конструкцию элементов. В этой связи следует заметить, что методика BFNS, казалось бы, решает проблему учета технологических ограничений, однако в (1) предполагается однородное легирование подложки, что, как будет показано ниже, не отражает современных тенденций в конструировании МДПТ. Кроме того, из [2—6] не ясно, как выбрать конструкции и их параметры для элементов СБИС с исходной проектной нормой.

Разработанный метод миниатюризации базируется на формализме представления обобщенной конструкции МДПТ, соответствующего требованиям высококачественной технологии, который явился результатом удачной декомпозиции структуры МДПТ на функциональные слои. Кроме активных p - и n -МДПТ как основных элементов КМДП СБИС, метод рассматривает все остальные элементы СБИС, которые составляют ее элементную базу. ЭБ СБИС представляет, в свою очередь, результат декомпозиции сложных функционально-интегрированных структур СБИС на простые элементы, ответственные за тот или иной параметр интегральной схемы, с одной стороны, и в то же время поддающиеся анализу на основе накопленного опыта исследователей — с другой. Таким образом, ЭБ КМДП (рис. 1) включает: активные элементы, такие как n - и p -МДПТ; паразитные (П) элементы, такие как p - и n -канальные ПМДПТ с подзатворными диэлектриками, представляющими собой слои полевой изоляции (типа слоев окисла, полученных методом локального окисления кремния — ЛОКОС-слоев); биполярные транзисторы с n - и p -базой (n - и p -ПБТ) латерального и вертикального типа; тиристорные структуры p - n - p - n -типа (ТС) и другие; пассивные элементы, такие как диоды n^+ - p и p^+ - n (n Д и p Д), сопротивления контактов (СК) и областей легированных диффузионных слоев (СДС), поликремниевых слоев (ПС) и т. д., а также емкости диффузионных слоев (ЕДС) и длинных линий шин межсоединений (ЕДЛ). Паразитные и пассивные элементы также, в свою очередь, декомпозируются на функциональные слои из полупроводников, диэлектриков и металлов.

Подход, связанный с декомпозицией СБИС на ЭБ, и функциональные слои позволяют строго ввести понятие перечня математических моделей. Матрица M , представляющая собой строки, соответствующие всем функциональным слоям СБИС, и столбцы, соответствующие каждому типу элементов всей ЭБ СБИС, являются формализованной моделью структуры СБИС. Клетки матрицы, соответствующие пересечению строк и столбцов, равны 1, если данный слой относится к элементу (определяет один из его параметров),

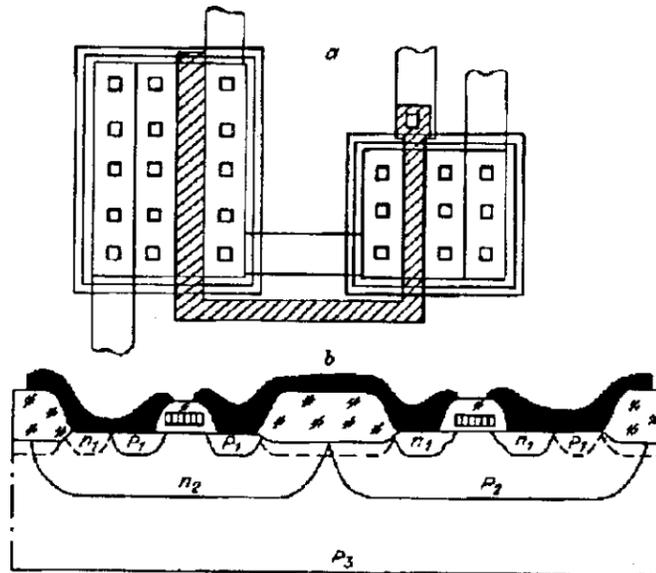


Рис. 1. Эскиз топологии КМДП-вентилля (а) и одно из его поперечных сечений (б):

p_1 — слой сильного легирования для создания стока-истока n -МДПТ и контакта к n -карману — слою с легированием
 p_2 ; p_1 — слой сильного легирования для создания стока-истока p -МДПТ и контакта к p -карману — слою p_2 на
 подложке p_3

и 0, если данный слой не входит в состав элемента. Клетка матрицы разбивается, в свою очередь, на подматрицу столбцов, соответствующих вектору параметров данного элемента, и строк, соответствующих вектору параметров слоя. Такая подматрица m_{ij}^c уже несет информацию о зависимости отдельных параметров элемента от параметров слоев. Описание зависимости параметров элемента от параметров слоев в пределах одной подматрицы или в пределах нескольких подматриц является математической моделью электрофизических параметров и характеристик элемента. В свою очередь, описание зависимости параметров и характеристик функциональных слоев СБИС от технологических параметров операций и маршрута изготовления СБИС в целом порождает математические модели технологии СБИС m_{ij}^a . Вся совокупность m_{ij}^c и m_{ij}^a представляет полный перечень математических моделей СБИС.

Если бы мы располагали всей совокупностью математических моделей (ММ) элементов и технологии (Т), то проблему миниатюризации элементов можно было бы сформулировать как задачу нелинейной оптимизации с ограничениями. Однако это сделать затруднительно, так как: 1) всей совокупности ММ ЭБ и Т нет даже в крупных коллективах исследователей [7, 8]; 2) адекватность ММ по мере изменения параметров ЭБ и Т может, вообще говоря, оказаться неудовлетворительной из-за нарушения предположений, использованных в ММ; 3) проблематично использование новых идей и технических решений в процессе выполнения формализованной процедуры оптимизации, хотя известно, что принципиальные ограничения принятых к использованию ЭБ и Т снимаются только новыми идеями (в эвристическом подходе). Поэтому одним из главных требований к методу миниатюризации является его адаптивность к новым техническим решениям, когда обнаруживаются принципиальные ограничения принятого пути уменьшения размеров элементов. Предлагаемый метод является полуформализованной процедурой решения указанной задачи оптимизации, который учитывает новые технические идеи.

Возможности метода продемонстрированы в диапазоне уменьшения проектных норм от 2 до 0,7 мкм. Этот диапазон взят, чтобы продемонстрировать трудности преодоления «барьера 1 мкм», который ведущими фирмами давно успешно пройден, однако не все осмыслено в процессе этого перехода. Поэтому результаты использования метода полезны фирмам, разрабатывающим технологию с субмикронными размерами. Развитый метод миниатюризации и формализм представления конструкций ЭБ, декомпозированных на функциональные слои, позволяют, как показал опыт, успешно использовать полученные результаты как в субмикронной области, так и при уменьшении температуры функционирования СБИС до 77 К.

1. Метод миниатюризации. Разработанный метод миниатюризации включает в себя четыре этапа: 1) выбор по определенным требованиям перспективной для миниатюризации элементной базы и технологического маршрута (ТМ) изготовления СБИС (выбор исходной ЭБ и ТМ); 2) мониторинг исходной ЭБ и ТМ на основе изготовления и измерений тестовых кристаллов со специальным набором тестовых структур по выбранной ЭБ и ТМ с целью получения и накопления количественных данных о параметрах и характеристиках ЭБ и ТМ; 3) математическое моделирование выбранных ЭБ и ТМ на основе системы или пакетов прикладных программ с целью уточнения данных и идентификации параметров элементов и технологии и получения в результате достаточно полного количественного описания исходной ЭБ и ТМ; 4) собственно масштабирование исходной ЭБ на основе некоторых известных законов (*CV*, *CE*, *QCV*, *G*, *BFNS* и других) для получения начального приближения для требуемой ЭБ и ее анализ и полуформализованная оптимизация на основе математического моделирования [9—15] с целью получения практической конструкции ЭБ и ее ТМ с учетом заданных требований. Все этапы достаточно строго формализуются и документируются для их выполнения, за исключением подэтапа «полуформальной оптимизации», где эффективность принятых решений по новым идеям для снятия технологических ограничений зависит от квалификации исследователей, а также и от квалификации экспертов, привлеченных для решения проблем преодоления принципиальных трудностей, а иногда и синтеза новых элементов и слоев.

В качестве исходной ЭБ и ТМ хотелось бы иметь оптимальную элементную базу для исходной проектной нормы, но таких в практике фактически не существует в силу ряда причин. Поэтому за исходную базу принимается квазиоптимальная ЭБ и ТМ серийно выпускаемой СБИС с наименьшей из используемых проектной нормой, ТМ которой содержит наибольшее количество новшеств, которые оцениваются экспертами как перспективные.

Если опыт исследований велик и накоплено определенное количество данных об ЭБ и ТМ, то мониторинг можно проводить по минимальному количеству тестовых структур, представляющих только все типы элементов, как перечислено выше. Если количественной информации недостаточно, то необходимо провести мониторинг технологии на основе достаточно полного набора тестовых структур с вариацией их параметров и использованием специальных структур типа расщепленных резисторов [16], структур Кельвина [17] и др.

В настоящее время нет полного набора математических моделей, вытекающего из структуры подматриц матрицы *M*. Это связано с тем, что разработанные самые необходимые модели легирования и окисления кремния и модели характеристик МДПТ и биполярных транзисторов на некоторое время решили проблему проектирования СБИС. А решение задач моделирования рельефа (топографии) элементов СБИС в процессах осаждения, снятия и локального травления слоев [18] или моделирования пассивных элементов [19, 20] и т. п. происходило более медленно. Только в последнее время в процессе преодоления «рубежа 1 мкм» эти задачи становятся актуальными и широко исследуются.

Успешное использование математического моделирования в практике исследований и разработок СБИС привело к новому отношению к количественной информации, поэтому развитие систем моделирования сейчас продолжается вместе с новым их разделом: подсистемой накопления данных на основе

математических моделей и программ идентификации (экстракции) параметров моделей. В данном подходе использованы современные программы моделирования [9—15] для исследования МДПТ и ряда паразитных элементов. Для целого ряда параметров других элементов использованы более простые известные из литературы аналитические модели, обсудить которые в рамках данной статьи не представляется возможным.

Практически все модели m_{ij} существенно нелинейные, поэтому использование рассмотренных методик масштабирования дает лишь оценку возможных значений параметров элементов. При этом иногда возникают принципиально-технологических ограничений весьма полезными окажутся в будущем экспертные системы микроэлектроники, которые автоматизируют процесс оптимизации ЭБ и ТМ, делая его более формализованным. Указанное применение пакетов программ математического моделирования ЭБ и ТМ не является единственным, так как они широко используются для решения ряда других задач [7—15], но использование их в методе миниатюризации ЭБ является наиболее неформальным и поэтому более сложным. Следует заметить, что выделение подматриц m_{ij} для построения замкнутой модели некоего элемента имеет определенный произвол. Так, например, структура вентиля может быть рассмотрена в целом как включающая достаточно большое число функциональных слоев и имеющая элементы типа n -МДПТ, p -МДПТ, n -ПМДПТ, p -ПМДПТ, ТС, n -ПБТ, p -ПБТ и др. в качестве внутренних субструктур. При этом характеристики вентиля моделируются на основе, например, двумерной фундаментальной системы уравнений (ФСУ) [19]. Такой подход полезен для более точного анализа и локальной оптимизации. Однако для решения задач миниатюризации этот подход не очень перспективен, ибо не позволяет эффективно найти ограничения решаемой задачи и использования новых конструкторских идей. Ниже рассматривается конкретный пример миниатюризации активных n - и p -МДПТ, который почти не затрагивает проблем паразитных и пассивных элементов из-за недостатка места, хотя все они были рассмотрены с необходимой степенью тщательности.

2. Обобщенная конструкция МДП-транзистора. Имеются две задачи при оптимизации МДПТ: 1) оптимизация профиля распределения примесей в вертикальном направлении под затвором в глубину подложки, позволяющая достичь предельных характеристик МДПТ главным образом по быстродействию [20]; 2) оптимизация профиля распределения примесей в области стока (и истока) в горизонтальном направлении с целью достижения предельных характеристик главным образом по надежности [21].

Наши исследования показывают, что на самом деле оптимальное решение первой задачи также повышает надежность и помехоустойчивость СБИС [13, 14], в то время как приемлемые решения второй задачи также повышают быстродействие СБИС. Следует заметить, что нам представляется, что достаточно простой, но высококачественной КМДП-технологией является технология с n -карманом на p -подложке, хотя есть и более изощренные типы конструкций КМДП-технологий [22]. Существуют следующие доводы в пользу n -кармана: коэффициенты ударной ионизации дырок почти на порядок меньше, чем электронов, поэтому малые токи ударной ионизации в карман будут меньше у p -МДПТ; меньшие токи в подложку на меньшую величину изменяют потенциал кармана и повышают помехоустойчивость СБИС; дырки имеют меньшую подвижность и при тех же размерах n -базы вертикального ПБТ дадут меньший коэффициент усиления этого ПБТ и соответственно меньший вклад в ток запуска тиристора и другие нежелательные эффекты, когда в динамическом режиме возможна коротковременная инжекция дырок из p^+ -стока p -МДПТ в карман; наконец, по мере увеличения уровня

легирования кармана n -типа время жизни неосновных носителей в кармане падает из-за эффекта роста концентрации глубоких центров рекомбинации, чего нет в слоях p -типа [23]. Поэтому ниже будет подразумеваться КМДП-технология с n -карманом при решении первой задачи.

На рис. 2 представлено поперечное сечение конструкции МДПТ, удовлетворяющего требованиям высококачественной технологии, предложенной в данной работе. Несмотря на то что использование слоев подлегирования типа слоев 1, 2, 4 на рис. 2 рассматривалось в [20, 24], до сих пор не были обсуждены требования самосогласования этих слоев. Кроме того, слой 3 функционально не выделялся, и требования к нему в контексте такой структуры не обсуждались. Из рис. 2 видно, что профиль распределения примеси в области стока имеет вид, типичный для конструкции со слаболегированным стоком (так называемые LDD-МДПТ). Имеется большой выбор идей создания области стока с малым градиентом концентрации примеси в p - n -переходе стока под затвором и смещением потока носителей вглубь от поверхности с целью обеспечения надежности и помехоустойчивости работы СБИС по отношению к эффектам деградации МДПТ, связанных с горячими носителями [21]. Несмотря на то что дискуссия вокруг оптимальной конструкции области стока еще будет продолжаться, тем не менее практические ограничения в создании сложных профилей легирования области стока показывают, что для серийных СБИС в ближайшее время, по крайней мере, до проектной нормы 0,5 мкм будут использованы LDD-МДПТ с вариантами способов изготовления LDD-области [21, 25]. Поэтому в данной работе примем, что область стока имеет вид LDD-структуры.

Рассмотрим вначале требования к каждому из слоев сечения n -МДПТ в вертикальном направлении. Считалось, что слой 1 задает V_{th} — пороговое напряжение n -МДПТ и напряжение прокола вдоль поверхности Si — SiO₂ между истоком и стоком. Анализ показывает, что для современных цифровых КМДП СБИС $V_{th} = (0,15-0,2)V_p$ обеспечивает приемлемое соотношение быстродействия и помехоустойчивости. Ниже это будет рассмотрено более подробно, а пока учтем, что в диапазоне длин каналов 2—0,7 мкм напряжение питания варьируется от 5 до 3 В, что согласуется с данными из [26]. Поэтому

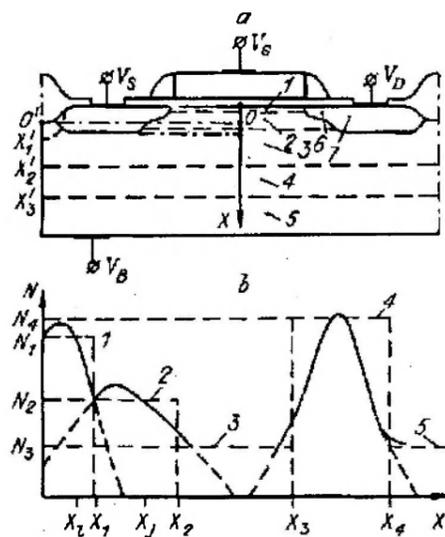


Рис. 2. Поперечное сечение МДПТ (а) с выделенными функциональными слоями (б):
1 — слой с уровнем легирования N_1 и глубиной X_1 ; 2 — слой с параметрами N_2 и X_2 ; 3 — слой с N_3 и X_3 ; 4 — слой с N_4 и X_4 ; 5 — слой подложки с легированием N_5 ; 6 — LDD-слой с глубиной X_6 ; 7 — слой стока-истока с глубиной X_7

для типичных квазиоптимальных параметров n -МДПТ (см. ниже) с проектной нормой 2—0,7 мкм уровни легирования N_1 в приповерхностный слой для получения V_{th} таковы, что по напряжению прокола V_{pr} имеется достаточно большой запас и этот параметр не является критичным, если выбрать определенную глубину легирования X_1 . Размером, с которым необходимо сравнивать величину X_1 , чтобы выбрать критерии оптимальности, является X_s — глубина ОПЗ под затвором в режиме сильной инверсии при $V_{pr} = 0$ и малых V_{th} . При $X_1 < X_s$ соответствующим подбором N_1 можно получить требуемую величину V_{th} . Однако известно, что чем больше N_1 , тем меньше подвижность носителей в канале и меньше крутизна МДПТ (поэтому тенденция 70-х годов регулировать V_{th} уровнем легирования в тонком приповерхностном слое сейчас выглядит просто неверной, ибо N_1 таковы в короткоканальных МДПТ, что уже имеется влияние N_1 на подвижность). При $X_1 > X_s$ концентрация N_1 за пределами X_s уже не служит заданию V_{th} , а увеличивает K_b — коэффициент влияния смещения подложки на V_{th} , уменьшая быстродействие схемы и обеспечивая в то же время избыточный запас по напряжению прокола V_{pr} . Поэтому можно полагать, что оптимальным является

$$X_1 = X_s, \text{ где } X_s = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_s \varphi_f / (qN_1)}, \quad (2)$$

здесь φ_f — потенциал Ферми в подложке в слое N_1 , отсчитанный от середины запрещенной зоны. Слой легирования N_2 должен обеспечивать V_{prb} — напряжение прокола в объеме МДПТ с разумным запасом. Эта величина $N_2 < N_1$. Глубину легирования X_2 слоя N_2 следует сравнивать с глубиной p - n -перехода стока X_j . Эти величины должны быть одного порядка $X_2 \geq X_j$, ибо если $X_2 < X_j$, то может произойти прокол подложки в объеме за счет двумерного эффекта [12]. Если же $X_2 > X_j$, то p - n -переход стока окажется фактически в области достаточно сильного легирования, что приведет к большой емкости p - n -перехода стока и уменьшению быстродействия схемы. Уровень легирования слоя N_3 должен быть как можно меньше, и толщина его X_3 самосогласованно не должна превышать толщины ОПЗ p - n -перехода стока при напряжении питания. Как было показано в [13, 14], слой легирования N_4 существенно увеличивает напряжение биполярного пробоя МДПТ за счет уменьшения времени жизни неосновных носителей в сильнолегированном слое, выравнивания потенциала подложки и уменьшения тока инжекции из истока из-за ослабления гальванической связи между током в подложку основных носителей из области ударной ионизации стока и током инжекции неосновных носителей из истока. Кроме того, слой N_4 , называемый иногда «ретроградным» слоем и используемый для увеличения напряжения и тока включения тиристора, уменьшает коэффициент передачи тока неосновных носителей через базу ПБТ появлением электрического поля, тормозящего носители, и компоненты оже-рекомбинации носителей в этом слое [24]. Увеличение напряжения и тока включения тиристора за счет N_4 может достигать избыточного запаса, который можно использовать с целью уменьшения «антиотиристорного» расстояния (между стоком n -МДПТ и истоком p -МДПТ), что позволяет фактически провести миниатюризацию размеров ПБТ и КМДП-вентиля в целом. Чтобы названные физические эффекты имели место, уровень легирования должен быть порядка 10^{18} см⁻³, величина X_4 определяется практическими возможностями. В [24] ретроградный слой имеет концентрацию примесей на поверхности, которая задает пороговое напряжение МДПТ. Это значит, что в таком варианте конструкции нельзя выделить слой $N_1 - N_3$ и получить возможность создания оптимального по быстродействию транзистора. При практической реализации предлагаемого подхода к созданию МДПТ иногда не удавалось конструировать все четыре слоя, идя на компромисс между достижениями быстродействия СБИС и экономическими возможностями их создания. Однако данный анализ непосредственно показывает причины недостижения рекордных результатов и пути их получения, связанные с конструированием МДПТ.

3. Практические результаты миниатюризации. В соответствии с вышеприведенными критериями в качестве исходной была выбрана ЭБ и ТМ серийно выпускаемой СБИС с проектной нормой 2 мкм, использующей полевую изоляцию ЛОКОС-типа, n^+ -легированный поликремний в качестве затворов p - и n -МДПТ, однократное легирование бором разными дозами в n - и p -карманы на p -подложке для задания V_{th} МДПТ (типичный так называемый "DIP"-процесс [27]) с LDD-областью стоков. Был проведен мониторинг ТМ. Результаты моделирования ЭБ и ТМ и измерений электрофизических характеристик и параметров ЭБ и ТМ, идентифицированных из результатов экспериментов, имели хорошее согласие между собой. Детали использованных методик в предельной работе рассмотреть не представляется возможным. Окончательные результаты для исходной элементной базы и технологического маршрута приведены в таблице, из которой видно, что исходная ЭБ по параметру X_1 (глубина легирования первого слоя) не является оптимальной в смысле, определенном в разд. 2.

Однако для получения результатов, адаптивных к конкретной технологии, этот параметр был далее сохранен постоянным, так как $X_1 < X_2$ с большим запасом. Также обращает на себя внимание то, что глубины p - n -переходов X_1 и X_2 достаточно малы для проектной нормы 2 мкм. Это связано с тем, что взятые исходные ЭБ и ТМ были выбраны как перспективные, для которых проблема мелких p - n -переходов частично решена. Необходимо заметить, что в эффекты зависимости параметров МДПТ от длины канала (размерные эффекты) главным образом входит глубина легирования LDD-слоя. Однако возможности ее уменьшения в практике ограничены, поэтому была поставлена задача определения изменения параметров МДПТ при миниатюризации в случаях наличия ограничений: а) $X_1 \geq 0,1$, $X_2 = 0,1$ мкм; б) $X_1 = 0,1$ мкм. Напряжение питания было принято по ряду соображений 5 В, и недавно это было подтверждено более основательно [26] для проектных норм Dr в диапазоне $0,7 < Dr < 2$ мкм. Поэтому основным в дальнейшем рассмотрении было CV -масштабирование.

На рис. 3, 4 приведены зависимости параметров n -МДПТ от проектной нормы Dr по законам масштабирования и принятому обобщенному методу миниатюризации (ОММ). Напряжение смыкания оценивалось в предположении, что оно задается слоем 2 по соотношению

$$V_{pb} + V_{bi} = (qN_2/2\epsilon_0\epsilon_s)(-r_w^2/2 + r_w^2 \ln(r_w)) \quad (3)$$

в приближении цилиндрической формы ОПЗ p - n -перехода с радиусом r_w . При отсутствии напряжения r_{w0} определяется из (3) при $V_{pb} = 0$. Величину r_w в первом приближении можно оценить как $r_w = Dr - b - 1,4X_j - (r_{w0} - 2X_j)$, где $b = 0,1Dr$ для технологии, сохраняющей относительную поправку на уxo-

Параметры МДПТ-транзисторов

№ п/п	Обозначение	Размерность	Тип МДПТ	
			n -канал	p -канал
1	V_{th}	В	0,93	-0,71
2	$N_1(N_{10})$	$см^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$
3	X_1	мкм	0,1	0,1
4	$N_2(N_{20})$	$см^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{16}$
5	V_{fb}	В	-0,9	-0,02
6	t_{ox}	нм	29	29
7	μ	$см^2/(В \cdot с)$	600	170
8	θ	$В^{-1}$	0,097	0,061
9	X_i	мкм	0,15	—
10	Dr	мкм	2	2
11	L_e	мкм	1,72	1,51
12	X_j	мкм	0,2	0,35

Примечание. V_{fb} — напряжение плоских зон, t_{ox} — толщина диэлектрика, μ — подвижность носителей в канале, θ — коэффициент влияния поперечного электрического поля на подвижность, Dr — проектная норма, L_e — эффективная длина канала, X_i — глубина p - n -перехода в области слабого легирования стока (LDD-слоя).

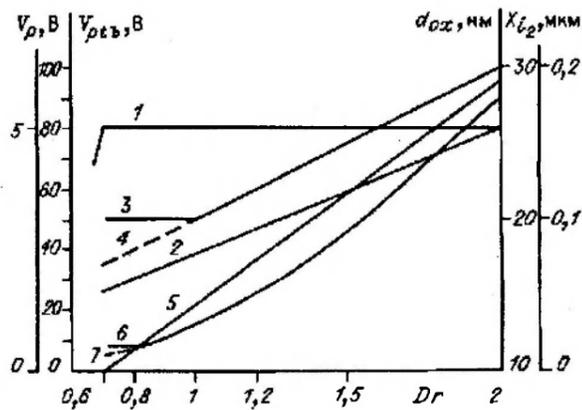


Рис. 3. Зависимости напряжения питания V_p (кривая 1 для закона CV, 2 — для CE), глубины $p-n$ -перехода X_j (кривая 3 — с учетом ограничений технологии, 4 — без ограничений), толщины диэлектрика t_{ox} (5), напряжения прокола (кривая 6 — для закона CV, 7 — для CE) от величины проектной нормы Dr

ды размеров затвора при изготовлении их с разной проектной нормой. На рис. 3, 4 и далее не обсуждаются величины N_3, N_4 , и X_2, X_3, X_4 , так как они принципиально не влияют на функциональные ВАХ n -МДПТ, а улучшают его «критические характеристики и параметры» (см. [12]). Критерии их определения даны выше, и их использование стало целесообразным, когда были получены экспериментальные результаты по первому этапу миниатюризации и поставлена задача достижения параметров высококачественной технологии (что выходит за рамки данной статьи). Изменение N_1 от величины N_{10} на рис. 4 в соответствии с кривыми 1 и 2 обеспечивает постоянство V_{th} (закон CV) или его величину $0,2V_p$ (закон CE) при неизменной глубине легирования $0,1$ мкм, чтобы приблизиться к оптимальной конструкции слоя 1 по мере уменьшения Dr . В силу большого запаса по V_{pb} из-за высокого легирования

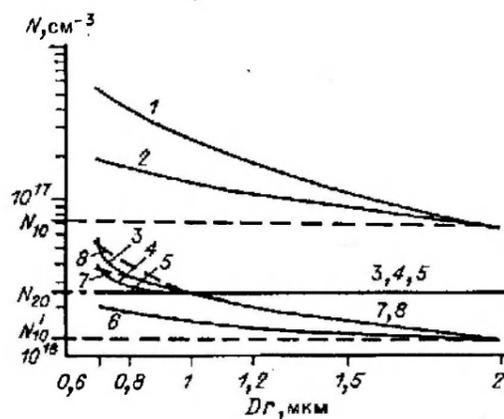


Рис. 4. Зависимости концентрации примеси N_1 в слое 1 (кривая 1 — для CV, 2 — CE), N_2 в слое 2 (кривые 3–8) от Dr .

Кривые 3, 8 получены по законам ОММ, 4, 7 — по законам CV, 5, 6 — по законам CE от исходных значений; N_{20} (кривые 3–5) взята в качестве исходной от эксперимента (неоптимальна, см. таблицу), N_{10}^i — в качестве исходной оптимальной, обеспечивающей отсутствие размерных эффектов, в соответствии с законом BFNS при прочих параметрах из эксперимента для $Dr = 2$ мкм

слоя N_2 (уровня легирования в p -карман) при уменьшении Dr величина $N_2 = N_{20}$ (см. рис. 4) не изменялась вплоть до $Dr = 1$ мкм. При $Dr < 1$ мкм V_{pb} становится меньше, чем $2V_p$ (двойной запас), если следовать CV -закону, поэтому требуется увеличить легирование в соответствии с кривой 4 на рис. 4 и, следовательно, получить кривую 6 на рис. 3 или можно оставить $N_2 = N_{20}$ для CE -закона (кривая 5, рис. 4) и, следовательно, найти кривую 7, рис. 3. Кривые 4, 5 (см. рис. 4) и 6, 7 (см. рис. 3) получены без учета ограничений на глубину p - n -перехода (т. е. X_j подчиняется кривой 4 на рис. 3). Однако с учетом ограничения $X_j \geq 0,1$ мкм (кривая 3, рис. 3) находится зависимость N_2 от Dr в соответствии с кривой 3 на рис. 4, полученной по закону BFNS от исходной точки с $Dr = 1$ мкм, где имеется излом кривой 3, рис. 3. Суть этого приема заключается в компенсации более высоким легированием слоя 2 (подложки в терминологии [6]) с целью подавления размерных эффектов, усиливающихся при уменьшении Dr и невозможности уменьшения глубины p - n -перехода.

Таким образом, казалось бы, получены основные параметры n -МДПТ для ряда Dr . Однако результат необходимо проверить на возможное наличие или появление размерных эффектов, проявляющихся в наклоне ВАХ подпороговой проводимости и зависимости V_{th} от длины канала и потенциала стока. Будем продолжать пользоваться законом BFNS. Для исходной конструкции n -МДПТ при заданных из таблицы X_j , t_{ox} и $V_{ds} = V_p = 5$ В легко показать, что только для $N_{10,20} < N'_{10}$ (см. рис. 4) появляется отклонение ВАХ МДПТ от характерных для длинноканального транзистора. Дальнейшее поведение N'_{10} (кривые 6—8 на рис. 4) таково, что приемлемые ВАХ получаются для практически всех Dr как с учетом ограничений, так и без них для CV - и CE -законов, и это не удивительно. Если подставить известные из CV - или CE -законов пропорции изменения X_j , t_{ox} и N_1 в соотношение (1), то получим инвариантные величины, т. е. CV - и CE -законы удовлетворяют требованиям отсутствия размерных эффектов. Более того, в развитой нами на основе идей работы [28] теории подпорогового тока для неоднородно легированной подзатворной области, как на рис. 2, показано, что законы CV и CE сохраняют наклон подпорогового тока.

При миниатюризации p -МДПТ следует обратить внимание на его особенность, которая широко распространена в промышленности. При использовании n^+ -поликремниевого затвора напряжение плоских зон p -МДПТ порядка 0 В. Чтобы обеспечить приемлемые характеристики по V_{pb} , используют довольно сильнолегированный карман (или подложку) более 10^{16} см⁻³, что приводит к высоким V_{th} (около 1,5 В и более). Уменьшение V_{th} до требуемых $0,2V_p$ достигается за счет компенсирующего легирования бором под затвор (слой 1 на рис. 2 с $N_1 < N_2$ или даже слабой перекомпенсацией). В силу простоты такой технологии она стала самой распространенной в промышленности, однако, как оказалось, не имеет перспектив в субмикронной области. На рис. 5 кривыми 5 и 6 показана зависимость $N_1 = N_2$ от Dr для CV -закона и предложенного метода миниатюризации с учетом ограничения на глубину p - n -перехода $X_j > 0,2$ мкм (известно, что p - n -переходы, получаемые ионным легированием бора, трудно изготовить мелкими из-за каналирования бора). Для поддержания $V_{th} = \text{const}$ соответственно изменяется и концентрация в слой 1 компенсирующего подлегирования (на рис. 5 не приведена). Крутизна p -МДПТ, получаемая в результате этого, падает с уменьшением Dr , как видно из кривой 1, рис. 6. Это фундаментальный факт, показывающий принципиальное ограничение принятой технологии для субмикронных Dr . Выход может быть только один: необходимо использовать материал затвора с более высокой работой выхода электронов. Такими материалами являются вольфрам [4], p^+ -поликремний, золото и ряд других (золото, правда, не технологично для этих целей). Предположим, что мы имеем материал с работой выхода на 1 эВ больше, чем n^+ -поликремний, тогда $v_{th} = +1$ В (по-видимому, p^+ -поликремний в связи с преодолением проблем пролегирования подзатвор-

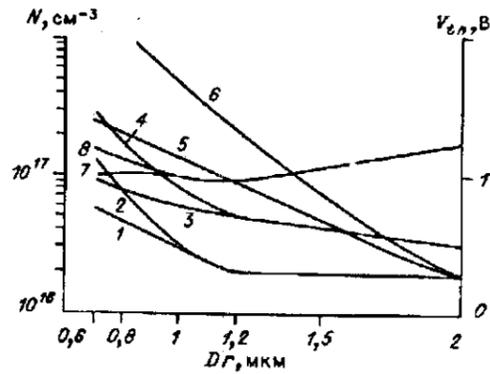


Рис. 5. Зависимости концентрации примеси в слоях p -МДПТ (кривые 1—6) и порогового напряжения (7, 8) от величины проектной нормы с компенсирующим легированием при $V_{fb} = \text{const}$ по СВ-закону (кривая 5) и ОММ (кривая 6); без компенсирующего легирования в слой 1 при миниатюризации по СВ-закону (1, 7), ОММ (2, 8) и по BFNS-закону без ограничений (3) и с ограничениями (кривая 4 для $X_j = 0,2$ мкм при $Dr < 1,2$ мкм)

ной области — реальный материал для этих целей). При выполнении затвора, обеспечивающего $V_{fb} = +1$ В, конструкция p -МДПТ становится аналогичной конструкции n -МДПТ с учетом более жесткого ограничения на X_j . Поскольку подход ясен, количественные результаты ниже не обсуждаются. Далее сделана попытка рассмотреть случай $V_{fb} = 0$ В, но без компенсирующего подлегирования. При этом V_{th} будет больше оптимального $0,2V_p$ на $0,2$ В. Поэтому без существенных потерь быстродействия СБИС интересно рассмотреть пригодность практических конструкций с $Dr = 1$ мкм к использованию в СБИС. Кривые 1 и 2 на рис. 5 показывают концентрации в слое 1 p -МДПТ с $V_{fb} = 0$ В с учетом ограничений на X_j (кривая 2) и без ограничений (кривая 1). Фактически ситуация для p -МДПТ без подлегирования и с $V_{fb} = 0$ В аналогична ситуации для n -МДПТ. Однако из-за меньшего уровня легирования в p -карман и большей глубины p - n -перехода стока, чем в n -МДПТ, размерные эффекты в p -МДПТ с рассматриваемой величиной t_{ox} имеют место даже в исходном p -МДПТ (с фактором формы $K_f = 0,85$, который равен 1, если размерные эффекты отсутствуют [3]).

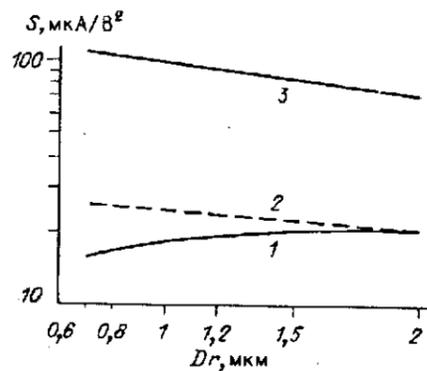


Рис. 6. Зависимость крутизны p -МДПТ при миниатюризации от проектной нормы по СВ-закону (кривая 1, соответствующая кривой 5, рис. 5, кривая 2 в случае использования p^+ -поликремниевых затворов) и для n -МДПТ (кривая 3, соответствующая кривым 1 и 3, рис. 4)

Кривые 3 и 4 на рис. 5 показывают зависимость N_1 от Dr в случае $K_f = 1$, достигаемого за счет увеличения уровня легирования согласно (1) по методике BFNS [6] с учетом ограничений и без них. Кривые 7 и 8 на рис. 5 соответствуют изменению V_{th} в зависимости от Dr , когда N_1 меняется в соответствии с кривыми 1, 2. Если использовать кривые 3, 4 на рис. 5 для N_1 , то V_{th} p -МДПТ будет несколько выше оптимального, которое можно уменьшить только за счет t_{ox} . Иметь t_{ox} для n -МДПТ и p -МДПТ различными достаточно сложно, поэтому было принято целесообразным использование кривых 1 и 2. Из рис. 6 видно, что крутизны как n -МДПТ, так и p -МДПТ увеличиваются для предлагаемого процесса миниатюризации (кривые 2 и 3, при расчете кривых учитывалась зависимость поверхно-

стной подвижности от концентрации примесей в области канала). Полученные результаты использованы при создании ЭБ и ТМ изготовления СБИС с проектной нормой 1 мкм с использованием ретроградного слоя. Эти ЭБ и ТМ были оптимизированы на основе методов моделирования.

Заключение. Разработан метод миниатюризации элементной базы, включающий систему сквозного моделирования элементов и технологии СБИС и представление о совокупной элементной базе СБИС, декомпозированной на основные конструктивные слои. Метод миниатюризации позволяет естественным образом включать новые идеи в конструировании и технологии в элементную базу и технологический маршрут СБИС. Предложена обобщенная конструкция МДПТ в вертикальном сечении, использующая четыре слоя легирования, удовлетворяющая требованиям высококачественной технологии, и проанализированы требования оптимальности к каждому слою. Получены практические результаты миниатюризации элементной базы и технологии КМДП СБИС в диапазоне проектных норм 2—0,7 мкм, показывающие невозможность использования массовой КМДП-технологии с n^+ -поликремниевыми затворами при проектной норме 1 мкм и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sai-Halasz G. A., Wordeman M. R., Kern D. P. et al. Experimental technology and performance of 0,1- μ m-gate length FETs operated at liquid-nitrogen temperature // IBM J. Res. Develop.—1990.—34, N 6.—P. 452.
2. Vaccarani G., Wordeman M. R., Dennard R. H. Generalized scaling theory and its application to a 1/4 micrometer MOSFET design // IEEE Trans. Electron. Dev.—1984.—ED-31, N 4.—P. 452.
3. Shichijo H. A re-examination of practical performance limits of scaled n -channel and p -channel MOS device for VLSI // Sol. State Electron.—1983.—26, N 10.—P. 969.
4. Hsu S. T. The limitation of short-channel — length N^+ -polysilicon-gate CMOS ICs // RSA Rev.—1985.—46.—P. 153.
5. Dennard R. H., Wordeman M. R. MOSFET-miniaturization from one micron to the limits // Physica.—1985.—129B, N 1—3.—P. 3.
6. Brews J. R., Fichtner W. F., Nicollan E. H., Sze S. M. Generalized guide for MOSFET miniaturization // IEEE Electron. Dev. Lett.—1980.—EDL-1, N 1.—P. 2.
7. Cole D. C., Buturla E. M., Furkay S. S. The use of simulation in semiconductor technology development // Sol. State Electron.—1990.—33, N 6.—P. 591.
8. Dutton R. W. Modelling of the silicon integrated-circuit design and manufacturing process // IEEE Trans. Electron. Dev.—1983.—ED-30, N 9.—P. 968.
9. Кольдяев В. И., Мороз В. А., Назаров С. А. Исследование асимптотических свойств краевой задачи о легировании и окислении кремния // Автометрия.—1986.—№ 6.
10. Кольдяев В. И., Святанев К. К. Математическое моделирование процессов переноса электронов в диэлектриках МДП-структур в сильных полях // Микроэлектроника.—1986.—15, вып. 3.
11. Кольдяев В. И., Мороз В. А., Назаров С. А. Двумерное моделирование легирования и окисления кремния // Автометрия.—1988.—№ 3.
12. Кольдяев В. И., Шахова О. Н., Пензин О. Ю. Моделирование методом неподвижного заряда основных характеристик элементов СБИС на основе МДП-транзисторов // Автометрия.—1988.—№ 3.
13. Kol'dyaev V. I., Malak V. E., Sinitsa S. P. Numerical simulation of bipolar conductivity effects at high-field in the drain region // Proc. 6th Internat. Conf. NASECODE-VI, Dublin, Ireland, 1989.—P. 403.
14. Кольдяев В. И., Малак В. Е., Синица С. П., Шварц Н. Л. Исследование методом численного моделирования вклада электростатического заряда подложки в эффекты биполярной проводимости МДП-транзистора // Микроэлектроника.—1992.—21, вып. 3.
15. Кольдяев В. И. Подсистема автоматизированного проектирования элементов СБИС РГЗУ // Электрон. техника. Сер. 3. Микроэлектроника.—1988.—Вып. 2(126).
16. Buehler M. G., Hershey C. W. The split-cross-bridge resistor for measuring the sheet resistance, linewidth and line spacing of conducting layers // IEEE Trans. Electron. Dev.—1986.—ED-33, N 10.—P. 1572.
17. Loh W. M., Swirhun S. E., Scheyer T. A. et al. Modeling and measurement of contact resistances // IEEE Trans. Electron. Dev.—1987.—ED-34, N 3.—P. 512.
18. Lee K., Sakai Y., Neureuther A. R. Topography-dependent electrical parameter simulation for VLSI design // IEEE Trans. Electron. Dev.—1983.—ED-30, N 11.—P. 1469.

19. Tomizawa M., Yokoyama K., Yoshii A. et al. Two-dimensional device simulator for gate-level characterization // Sol. State Electron.—1982.—25, N 9.—P. 913.
20. Shibata T., Hieda K., Sato M. et al. An optimally designed process for submicrometer MOSFETs // IEEE Trans. Electron. Dev.—1982.—ED-29, N 4.—P. 531.
21. Sanchez J. J., Hsuen K. K., De-Massa T. A. Drain-engineered hot-electron-resistant device structures: a review // IEEE Trans. Electron. Dev.—1989.—36, N 6.—P. 1125.
22. Parrillo L. C., Pfister J. R., Lin J.-H. et al. Disposable polysilicon LDD-spacer technology // IEEE Trans. Electron. Dev.—1991.—38, N 1.—P. 39.
23. Van Overstraeten R. J., Mertens R. P. Heavy doping effects in silicon // Sol. State Electron.—1987.—30, N 11.—P. 1077.
24. Lewis A. G., Martin R. A., Huang T.-Y. et al. Latchup performance of retrograde and conventional *n*-well CMOS technologies // IEEE Trans. Electron. Dev.—1987.—ED-34, N 10.—P. 2156.
25. Krieger G., Sicora R., Cuevas P. P. et al. Moderately doped NMOS (M-LDD)-hot electron and current drive optimization // IEEE Trans. Electron. Dev.—1991.—38, N 1.—P. 121.
26. Kakumu M., Kinugawa M., Hashimoto K. Choice of power supply voltage for half-micrometer and lower submicrometer CMOS devices // IEEE Trans. Electron. Dev.—1990.—37, N 5.—P. 1334.
27. Yamaguchi T., Morimoto S., Kawamoto G. H. et al. Process and device performance of 1- μ m-channel *n*-well CMOS technology // IEEE Trans. Electron. Dev.—1984.—ED-31, N 2.—P. 205.
28. Van Overstraeten R. J., Declerck G. J., Muls P. A. Theory of the MOS transistor in weak inversion // IEEE Trans. Electron. Dev.—1975.—ED-22, N 5.—P. 282.

Поступила в редакцию 7 мая 1992 г.

УДК 621.382.323 : 53

В. И. Кольдяев, Н. Л. Шварц

(Новосибирск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ И ВСТРОЕННОГО ЗАРЯДА НА СТАЦИОНАРНЫЕ ВАХ *n*-КАНАЛЬНЫХ МДПТ

Дан краткий обзор представлений о причинах деградации короткоканальных МДП-транзисторов, подвергавшихся воздействиям сильных электрических полей (стрессов). Моделируется влияние однородно и неоднородно распределенных по длине канала поверхностных состояний (ПС) и фиксированного заряда Q_{ss} на стационарные ВАХ МДП-транзисторов. Расчеты проводились по усовершенствованной программе двумерного численного моделирования MOS2, использующей диффузионно-дрейфовое приближение и учитывающей заряд на ПС. На основании численного моделирования предложена методика экспериментального исследования определенных ВАХ исходного и деградированного МДПТ, необходимых для идентификации последствий стресса.

Введение. В последние годы вновь усилился интерес к влиянию заряда поверхностных состояний (ПС) на характеристики МДП-транзисторов (МДПТ) в связи с проблемами деградации короткоканальных транзисторов [1—5]. Деградация характеристик МДПТ вызывается горячими носителями и является одним из серьезных препятствий дальнейшего увеличения интеграции элементов СБИС [5]. Деградация проявляется в сдвиге порогового напряжения на величину ΔV_t , уменьшения крутизны g_m в линейной области или в области насыщения подвижности, уменьшении тока стока в режиме насыщения I_{ds} на величину ΔI_{ds} и изменении на ΔS крутизны подпорогового тока, характеризующего наклон ВАХ в режиме подпороговой проводимости $\left(\frac{\partial V_g}{\partial \lg I_d}\right)$ [2, 3]. Экспериментально была установлена почти линейная зависимость между параметрами ΔV_t , $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$, $\Delta g_m/g_{m0}$, ΔS , поэтому качественно описать деградацию характеристик МДПТ можно, изучая изменения любого из этих параметров [2].