

# Увеличение радиационной стойкости аналого-цифровых компонентов микроэлектронных систем

Олег Дворников, Виталий Гришков,  
Ольга Громыко (Минск, Беларусь)

**В статье проанализировано влияние проникающей радиации на параметры основных интегральных элементов. Рассмотрены конструктивно-технологические особенности транзисторов, предназначенных для реализации аналого-цифровых компонентов радиационно-стойких микроэлектронных устройств типа «система в корпусе».**

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно возросла потребность в аналого-цифровых устройствах, функционирующих в условиях воздействия проникающей радиации [1–3], что стимулировало работы по миниатюризации, сокращению межсоединений и количества дискретных элементов [4], а также по созданию конструктивно-схематических решений радиационно-стойких аналоговых компонентов [5–7].

Миниатюризация микросхем привела к появлению СБИС типа «система на кристалле» (СнК). В общем случае система на кристалле может включать в себя различные типы блоков: программируемые процессорные ядра, блоки программируемой логики, памяти, периферийных устройств, аналоговые компоненты и различные интерфейсные схемы [8].

Сложность проектирования СнК и невозможность обеспечения в ряде случаев требуемого уровня характеристик аналоговых и цифровых блоков при использовании одной технологии их изготовления способствовали созданию альтернативного типа микроэлектронных устройств – «систем в корпусе» (СвК), которые содержат несколько кристаллов внутри одного корпуса. Кристаллы располагаются на одном уровне или один над другим, дополняются пассивными или иными необходимыми компонентами и образуют интегрированные модули в одном корпусе, которые обеспечивают полноценное функционирование конечного электронного устройства [4].

Целью настоящей статьи является анализ проблем проектирования ра-

диационно-стойких микроэлектронных систем и выбор типа их реализации, рассмотрение технологии изготовления и топологических особенностей транзисторов, предназначенных для применения в высококачественных аналоговых блоках, малочувствительных к радиационному облучению.

## ВЫБОР ТИПА РЕАЛИЗАЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Известно, что создание аналого-цифровых микроэлектронных систем усложняется значительными проблемами в проектировании, верификации и производстве. Одна из причин – переход к субмикронным размерам элементов. Так, МОП-транзисторы с малой длиной затвора имеют большую малосигнальную передающую способность (крутизну). В то же время они обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение в аналоговых блоках, а именно: значительным разбросом порогового напряжения и удельной крутизны, приводящим к появлению большого напряжения смещения операционных и дифференциальных усилителей; высоким уровнем низкочастотного шума типа  $1/f$ ; малой величиной выходного малосигнального сопротивления и усиления каскадов с активной нагрузкой. Небольшие размеры транзистора приводят к уменьшению пробивного напряжения, что вынуждает снижать напряжение питания и ухудшать отношение сигнал/шум.

Особо актуальным и трудоёмким является выбор параметров и режимов работы МОП-транзисторов, вольтамперные характеристики (ВАХ) кото-

рых различны в линейной области и области насыщения, в режиме сильной и слабой инверсии, для длинноканальных и короткоканальных транзисторов [9]. В этой связи параметрическая оптимизация схем на субмикронных МОП-транзисторах превращается в многофакторный процесс, занимающий продолжительное время даже при использовании современных средств автоматизированного проектирования.

В настоящее время появилась необходимость разработки микроэлектронных систем, содержащих цифровые, аналоговые и высокочастотные (ВЧ) блоки. Качество подобных изделий, реализованных в виде СнК, в большой степени определяется квалификацией и опытом разработчиков, которые должны объединить в одном кристалле аналоговые, цифровые и ВЧ-компоненты с учётом их возможного взаимодействия по полупроводниковой подложке, шинам питания, корпусу микросхемы и печатной плате.

Таким образом, применение передовых микроэлектронных технологий не гарантирует достижения наилучшего качества СнК с большим количеством аналоговых функций, но может существенно увеличить время и стоимость их проектирования и производства.

Указанные проблемы СнК усилили актуальность производства СвК, так как СвК – объединение нескольких различных кристаллов, в том числе, сформированных на основе кремния на изоляторе и кремния на сапфире, модулей памяти, цифровой логики, пассивных компонентов, фильтров и антенн в одном стандартном или специально спроектированном корпусе. При разработке СвК главное внимание уделяют не увеличению количества применяемых транзисторов, а числу различных функций, которые можно интегрировать в одном устройстве на основе апробированных ранее технологических решений макси-

мально на дешёвым и надёжным способом.

Применение СВК позволяет обеспечить [4]:

- значительное увеличение выполняемых функций в единице объёма и веса;
- снижение энергопотребления;
- создание уникальных аналогов цифровых систем;
- значительное уменьшение стоимости проектов и сроков реализации за счёт сокращения квалификационных испытаний.

Дополнительным преимуществом микроэлектронных систем в виде СВК является возможность параллельной работы над различными компонентами разработчиков, специализирующихся в узком направлении электроники (ВЧ-устройства, прецизионные аналоговые микросхемы, антенны, датчики и др.), а также возможность применения в одном изделии разных технологий, несовместимых при изготовлении полупроводниковых микросхем. Так, для обеспечения максимального быстродействия цифровых устройств целесообразно применение КМОП-элементов с минимальным размером 0,18 или 0,09 мкм, в прецизионных аналоговых блоках – биполярной или биполярной/МОП-технологии, в маломощных усилителях – полевых транзисторов с р-п-переходом (ППП), в ВЧ-устройствах – транзисторов, сформированных на арсениде галлия и др.

С нашей точки зрения, СВК являются наиболее перспективным видом реализации микроэлектронных систем, содержащих высококачественные аналоговые компоненты, особенно для работы в условиях радиационного воздействия.

### ВЛИЯНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При проектировании радиационно-стойких микросхем необходимо учитывать зависимость параметров интегральных элементов от вида (гамма-излучение, поток нейтронов или иных частиц) и характеристик (поглощённая/экспозиционная доза, мощность дозы, величина потока частиц и их энергия) радиационного облучения.

Гамма-излучение обычно оказывает слабое влияние на объём кремния, но вызывает значительные переходные

процессы (фототоки) из-за генерации электронно-дырочных пар. Повреждения объёма полупроводника наступают только при большой энергии квантов облучения. Главным образом, воздействие гамма-излучения приводит к появлению положительного заряда в окисле и поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> при большой величине поглощённой дозы.

Захваченный ловушками в окисле положительный заряд индуцирует отрицательный заряд в кремнии на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, который может создать области обеднения, инверсионный слой в кремнии р-типа или область обогащения в кремнии n-типа (см. рис. 1). Если инверсионный слой соединяет две области n-типа, находящиеся при разном потенциале (см. рис. 2), то возможно появление тока утечки.

Плотность положительного заряда Q<sup>+</sup>, захваченного ловушками в окисле на границе раздела (на единицу площади, см<sup>-2</sup>), составляет:

$$Q^+ = 8 \times 10^8 D \gamma T_{Ox} P_T \quad (1)$$

где Dγ – поглощённая доза гамма-излучения в рад; T<sub>Ox</sub> – толщина окисла в мкм; P<sub>T</sub> – вероятность того, что генерируемая в окисле дырка будет захвачена ловушкой на границе раздела.

Второй значительный эффект, вызываемый гамма-излучением, – генерация поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. На поверхности р-типа проводимости, применяемой в n-МОП-транзисторах, поверхностные состояния заряжаются до нейтральной или отрицательной величины и, таким образом, могут уменьшить влияние положительного заряда окисла.

Известно, что для области насыщения МОП-транзистора справедливо соотношение [9]:

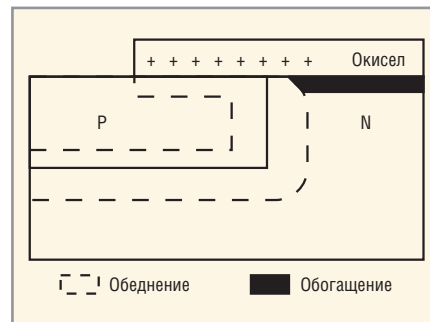


Рис. 1. Влияние положительного заряда окисла на p-n-переход

$$\sqrt{I_D} \approx \sqrt{\frac{\beta}{2}} (V_{GS} - V_{TH}) \quad (2)$$

где I<sub>D</sub> – ток стока, β – удельная крутизна передаточной характеристики, V<sub>GS</sub> – напряжение затвор-исток, V<sub>TH</sub> – пороговое напряжение.

Следовательно, точка пересечения кривой  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  с осью V<sub>GS</sub> характеризует пороговое напряжение V<sub>TH</sub>, а наклон кривой описывает удельную крутизну передаточной характеристики β (кривая 0 на рис. 3).

Влияние гамма-излучения на кремниевый n-МОП-транзистор и его характеристики иллюстрирует рисунок 3 [10]. После воздействия гамма-излучения среднего уровня (кривая 1, рис. 3) происходит накопление заряда в окисле вблизи границы раздела, что приводит к уменьшению порогового напряжения V<sub>TH</sub>, вплоть до появления в транзисторе встроенного канала (изменение плотности напряжения, соответствующего точке пересечения кривой  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  с осью V<sub>GS</sub>).

Появляющиеся при высоком уровне гамма-излучения поверхностные состояния уменьшают влияние положительного заряда на пороговое напряжение (пороговое напряжение растёт), но в то же время уменьшают подвижность носителей заряда и крутизну (кривая 2, рис. 3). Типичная за-

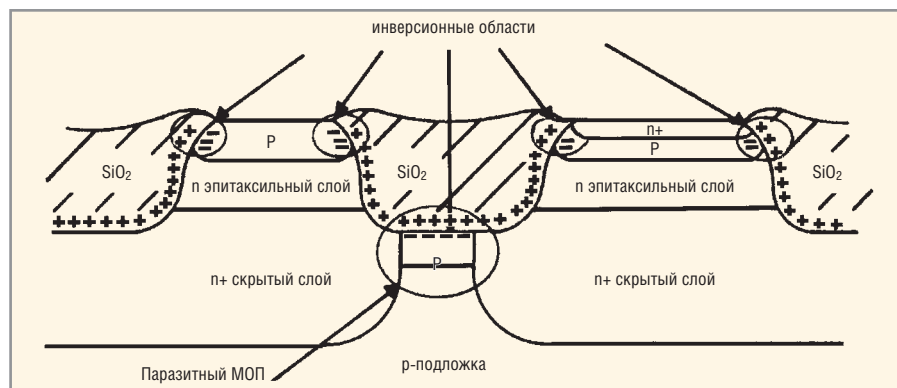


Рис. 2. Области появления инверсионных каналов под воздействием гамма-излучения [10]

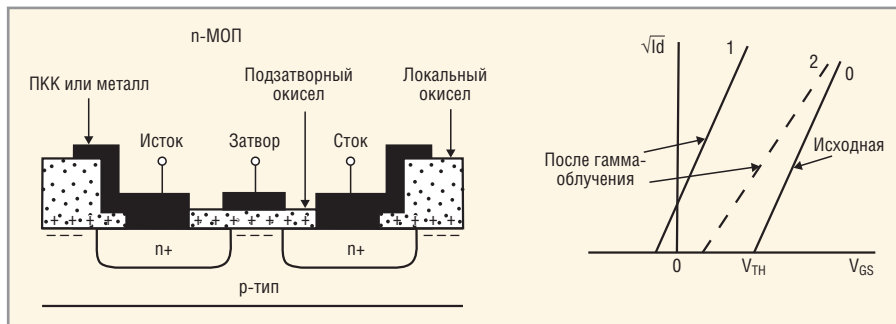


Рис. 3. Влияние гамма-излучения на кремниевый n-MOSFET-транзистор и его характеристики [10]

зависимость порогового напряжения от поглощённой дозы гамма-излучения для кремниевых МОП-транзисторов приведена на рисунке 4.

Величина изменения (сдвига) порогового напряжения  $\Delta V_{TH}$  сильно зависит от толщины окисла, применяемых технологических процессов формирования МОП-транзисторов и напряжения на затворе транзистора во время воздействия гамма-излучения. Если сдвиг порогового напряжения обусловлен только положительным зарядом окисла, то справедливо выражение [10, 11]:

$$\Delta V_{TH} = -0,038D\gamma T_{ox}^2 P_T \quad (3)$$

Таким образом, гамма-облучение ухудшает параметры интегральных транзисторов, в том числе:

- пороговое напряжение как n-MOSFET, так и p-MOSFET транзисторов уменьшается при малых поглощённых дозах, при больших поглощённых дозах пороговое напряжение p-MOSFET продолжает уменьшаться, а n-MOSFET начинает увеличиваться, причём крутизна МОП-транзисторов с любым типом проводимости канала при большой поглощённой дозе уменьшается;
- встроенный положительный заряд в окисле приводит к появлению утечек сток-исток в n-MOSFET-транзисторах

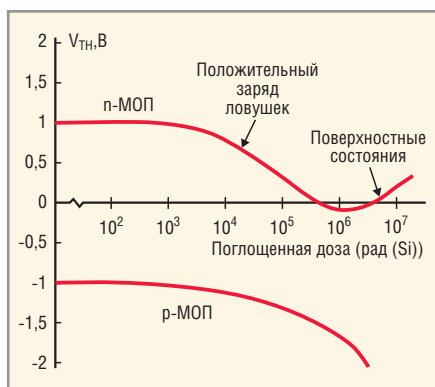


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения от поглощенной дозы гамма-излучения кремниевых МОП-транзисторов [10]

рах и коллектор-эмиттер в n-p-n транзисторах вдоль любых слаболегированных областей p-типа проводимости;

- статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером ( $\beta$ ) биполярных транзисторов (БТ) уменьшается. Если на БТ воздействует низкоэнергетическое излучение, то спад  $\beta$  в основном обусловлен усилением рекомбинационных процессов в увеличившихся областях пространственного заряда на поверхности, площадь которых и, следовательно, спад усиления прямо пропорциональны периметру эмиттерного перехода n-p-n БТ.

Воздействие потока нейтронов вызывает появление радиационных дефектов, что значительно влияет на электрофизические характеристики полупроводникового материала, а именно: уменьшаются время жизни неосновных носителей заряда, концентрация основных носителей заряда и подвижность [11–14]. Эт и изменения могут частично восстанавливаться с течением времени в зависимости от температуры полупроводника (отжигаться).

При нейтронном облучении изменяются параметры полупроводниковых приборов, а именно:

- уменьшается коэффициент передачи тока  $\beta$ , увеличиваются обратные токи и напряжение насыщения БТ;
- деградация усиления биполярных транзисторов прямо пропорциональна времени пролёта неосновных носителей заряда через базовую область;
- возрастает дифференциальное сопротивление диодов в прямом направлении, прямое падение напряжения диодов, обратное напряжение пробоя и обратные токи;
- при высоких уровнях облучения почти полностью и исчезают выпрямительные свойства диода;

- изменение параметров МОП- и ПТТ-транзисторов незначительно.

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОСХЕМ, МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К РАДИАЦИОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Существенно увеличить радиационную стойкость микросхем возможно путём применения и известных с химотехнических и конструктивно-технологических решений [5–7, 15–19], в том числе для сохранения работоспособности при гамма-облучении рекомендуется:

- использовать в качестве подложки МОП-схем тонкую слаболегированную эпитаксиальную плёнку (карман), расположенную на сильнолегированной подложке (скрытом слое), или применять диэлектрическую изоляцию интегральных элементов для устранения эффекта «защёлкивания» p-n-p-n-структур, возникающего из-за протекания фототоков;
- формировать резисторы на сильнолегированных полупроводниковых слоях или применять тонкоплёночные резисторы;
- уменьшать толщину окисла;
- максимально увеличивать концентрацию примеси в областях p-типа проводимости;
- вокруг n-MOSFET транзисторов формировать сильнолегированные охраняющие кольца p-типа проводимости;
- исключать контакт n+ эмиттерной области БТ с окислом;
- уменьшать периметр n+ эмиттерной области;
- максимально увеличивать плотность эмиттерного тока БТ за счёт уменьшения площади эмиттера;
- эмиттер и коллектор горизонтальных p-n-p-транзисторов выполнять с помощью сильнолегированных полупроводниковых областей.

Для снижения чувствительности параметров к нейтронному облучению целесообразно формировать БТ с тонкой базовой областью и максимально увеличивать плотность эмиттерного тока.

Большинству приведённых требований удовлетворяет технологический маршрут (техмаршрут) формирования БТ и ПТТ, применённый при изготовлении базового матричного кристалла типа АБМК\_1\_3 [7]. Сильнолегированные p+-резисторы, ПТТ с каналом p-типа, n-p-n-биполярные транзисторы

АБМК\_1\_3 малочувствительны к воздействию потока нейтронов и гамма-излучения. Однако сильное радиационное изменение характеристик горизонтальных р–п–р-транзисторов усложняет синтез некоторых радиационно-стойких схем, а отсутствие на АБМК\_1\_3 МОП-элементов не позволяет эффективно интегрировать на одном кристалле аналоговые и цифровые блоки.

С нашей точки зрения, для создания радиационно-стойких аналого-цифровых устройств для СВК целесообразно применять технологический маршрут изготовления биполярных и КМОП-транзисторов с минимальной проектной нормой 0,8 мкм (0,8 мкм Би-КМОП).

Техмаршрут 0,8 мкм позволяет использовать при синтезе СБИС разнообразные элементы:

- п–р–п биполярные транзисторы с разной площадью эмиттера, формируемого диффузией примеси из поликристаллического кремния (ПКК), расположенного на базовом окисле толщиной  $d \approx 0,14$  мкм (т.н. слой ПКК3 в технологическом маршруте);
- кольцевые горизонтальные р–п–р-БТ с минимальной топологической шириной базы, равной 1,8 мкм;

- п-МОП и р-МОП-транзисторы с минимальной топологической длиной затвора ( $L$ ), равной 0,9 и 1,0 мкм соответственно и толщиной подзатворного окисла 13 нм;
- резисторы р-типа проводимости (р-резисторы) с ПКК3-управляющей обкладкой;
- р<sup>+</sup>-резисторы;
- резисторы в слое ПКК2 (затвор МОП-транзисторов);
- конденсаторы с различными удельной и паразитной емкостями и диэлектриком между обкладками в виде  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , подзатворного окисла, межслойного диэлектрика.

Основным преимуществом 0,8-мкм Би-КМОП по сравнению с техмаршрутами с меньшими проектными нормами (0,25 мкм и менее) является обеспечение пробивного напряжения коллектор–эмиттер и сток–исток не менее 9 В, что гарантирует работоспособность аналоговых устройств при типичном биполярном напряжении питания, равном  $\pm 5$  В.

При разработке радиационно-стойких микросхем с помощью техмаршрута 0,8 мкм Би-КМОП следует учитывать ряд факторов:

- п–р–п-транзисторы обладают малыми площадями р–п-переходов и толщиной активной базы около 0,15 мкм, что обуславливает незначительную величину фототоков при гамма-облучении и малую деградацию  $\beta$  под воздействием нейтронов;
- резисторы на области р-типа проводимости с ПКК3-управляющей обкладкой представляют собой МОП-структуры с концентрацией примеси в полупроводнике около  $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и толщиной окисла под ПКК-обкладкой, равной 0,14 мкм. ПКК-управляющая обкладка обычно соединяется с выводом резистора, имеющим наибольший потенциал, для дополнительного увеличения сопротивления резистора путём обеднения приповерхностных р-областей под воздействием МОП-эффекта. Такие резисторы имеют высокое слоиное сопротивление ( $R_s = 2,4 \text{ кОм/кв.см}$ ) и занимают предельно малую площадь кристалла. В то же время они характеризуются значительной нелинейностью ВАХ и чувствительны к гамма-излучению (изменяется пороговое напряжение МОП-структуры) и потоку нейтронов



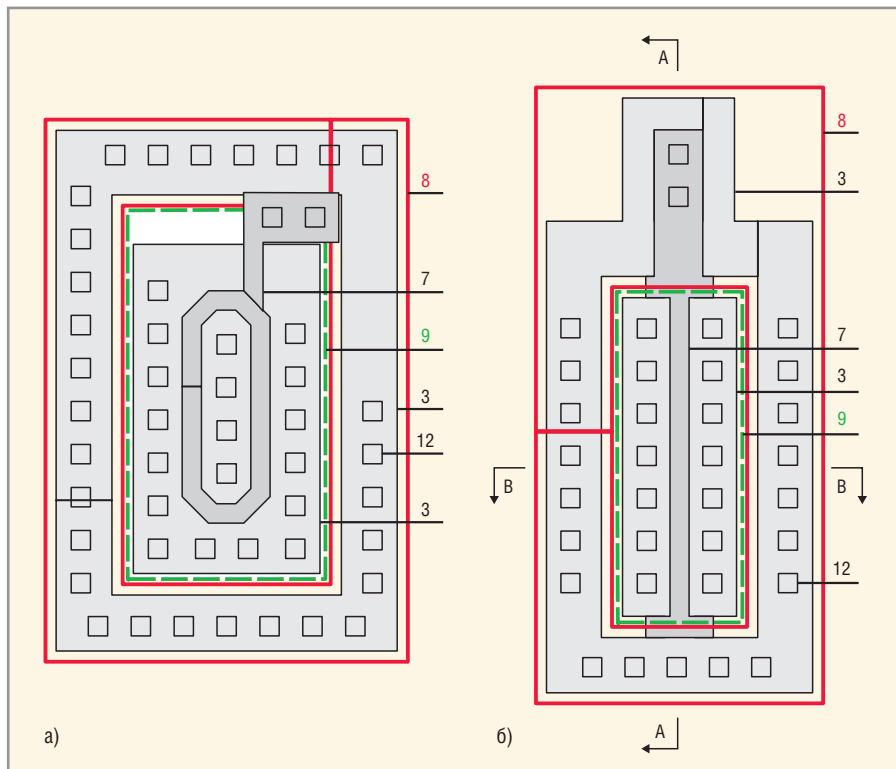


Рис. 5. Эскиз топологии n-MOS-транзисторов

3 – разделение (вне слоя 3 – локальный окисел), 7 – ПКК затвор, 8 – p+-исток, 9 – n+-исток, 12 – контакты: а) с замкнутым затвором, б) с охранным кольцом

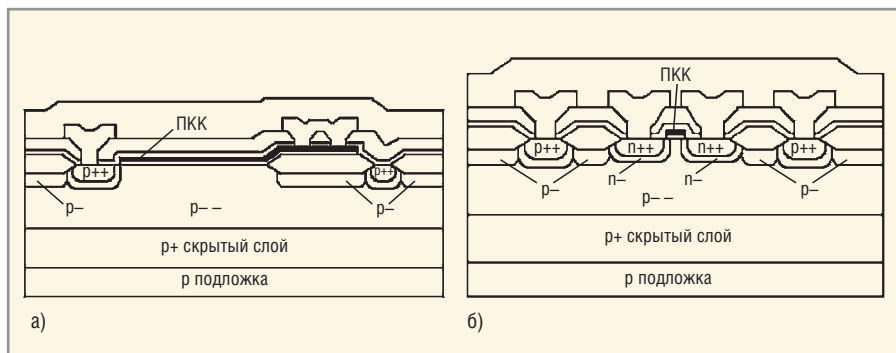


Рис. 6. Разрез конструкции n-MOS-транзистора, показанного на рис. 5б

а) сечение А-А, б) сечение В-В

(уменьшается концентрация носителей заряда в токопроводящем теле резистора). В радиационно-стойких аналоговых микросхемах в качестве резисторов рекомендуется применять либо p-MOS-транзисторы в линейной области ВАХ, либо полупроводниковые резисторы, выполненные на области p-базы n-p-n-транзистора. Последние сохраняют постоянное значение сопротивления в широком диапазоне рабочих напряжений и при радиационном воздействии благодаря более высокой концентрации примеси ( $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), но занимают значительную площадь кристалла;

● экспериментальные исследования [20] позволили установить, что для MOS-транзисторов с толщиной под-

затворного окисла менее 10 нм главной причиной радиационных отказов является возникновение токов утечки вдоль областей p-типа проводимости, находящихся под толстым локальным (разделительным) окислом. Толщина подзатворного окисла, равная 13 нм, объясняет незначительное изменение при гамма-облучении порогового напряжения MOS-транзисторов, сформированных с помощью 0,8 мкм Би-КМОП техмаршрута;

● топологическая толщина базы горизонтального p-n-p-транзистора для рассматриваемой технологии составляет 1,8 мкм, что существенно больше, чем в p-n-p-БТ, поэтому, а также в связи с сильным влиянием поверхностных эффектов, радиаци-

онные изменения  $\beta$  горизонтального p-n-p-транзистора под воздействием потока нейтронов и гамма-излучения значительны.

Таким образом, при применении 0,8-мкм Би-КМОП-техмаршрута для изготовления радиационно-стойких СБИС необходимо модернизировать конструкцию n-MOS и горизонтального p-n-p- транзисторов. Например, адаптировать к применяемому техмаршруту известные конструкции [19–22] n-MOS-транзисторов с p+-охранными кольцами, с замкнутым затвором, горизонтального p-n-p-транзистора с базовой областью, покрытой затвором.

Эскизы топологии и разрезы модернизированных транзисторов показаны на рисунках 5 – 7 [23].

Как отмечалось выше, инверсионный слой образуется из-за аккумуляции индуцированного радиацией положительного заряда в окисле кремния и приводит к появлению токов утечки между истоком и стоком, а также между областями n+-типа ближайших транзисторов. Утечку стока-исток можно устранить, если ток стока будет протекать только под затвором, например в структуре с замкнутым затвором (см. рис. 5а). В ней центрально расположенная область стока окружена замкнутым затвором и истоком, поэтому любой ток от истока к стоку протекает только под затвором и нет никаких токопроводящих каналов между истоком и стоком вдоль толстого локального окисла (разделения). Поскольку технологический маршрут не допускает формирования контакта к затвору над активной структурой, для выполнения соединения с затвором применена ПКК-полоска, выходящая на локальный окисел за активной структурой.

Для устранения утечек между n-MOS-транзисторами сформированы охранные кольца p+-типа проводимости, к которым выполнено максимальное количество контактов, покрытых токопроводящими межсоединениями, соединёнными с отрицательным напряжением питания (см. рис. 5а, 5б). Уменьшение сопротивления охранных колец позволяет устранить эффект «защёлкивания» p-n-p-структур. В отличие от известной конструкции [20], центральная область n+-типа проводимости использована в качестве стока n-

МОП-транзистора, что позволило уменьшить сопротивление истока и ёмкость стока. Последнее особенно важно для аналоговых схем, т.к. приводит к росту усиления и расширению полосы пропускания каска до с общим истоком.

Теоретические и экспериментальные исследования [20, 21] n-МОП-транзисторов с замкнутым затвором выявили, что в транзисторах с центральной областью, близкой по форме к квадрату, малое эффективное отношение ширины затвора к его длине ( $W/L$ ) достигается при больших размерах транзисторов. Кроме того, такие транзисторы характеризуются большим разбросом параметров, чем традиционные. В связи с этим затруднено применение n-МОП-транзисторов с замкнутым затвором и квадратным стоком в основном схемотехническом решении аналоговых схем – «токовом зеркале». В разработанной конструкции (см. рис. 5а) центральная область n-типа проводимости выполнена в виде, близком к прямоугольнику с большим отношением сторон, что уменьшает влияние узкой и наклонных сторон на точность масштабирования характеристик.

К сожалению, применение n-МОП-транзисторов с замкнутым затвором усложняет синтез аналоговых схем, поскольку высокоточное масштабирование параметров транзисторов обычно достигается за счёт параллельного соединения структур с минимальным квадратным стоком, что увеличивает площадь кристалла, а структуры с прямоугольным стоком нецелесообразно применять в микромощных схемах.

В альтернативной конструкции n-МОП-транзистора (см. рис. 5б) для предотвращения утечки между n+-областями истока и стока вдоль толстого локального окисла затвор выводится на охранное кольцо по тонкому подзатворному окислу.

Конструкция горизонтального p-n-p-транзистора, показанная на рисунке 7, содержит затвор, покрывающий поверхность базовой области, что позволяет сформировать самосовмещённые области эмиттера и коллектора для минимизации толщины базы, увеличения  $\beta$  и граничной частоты. Слаболегированные области стока и истока, перекрывающие эмиттер и коллектор, предотвращают ударную

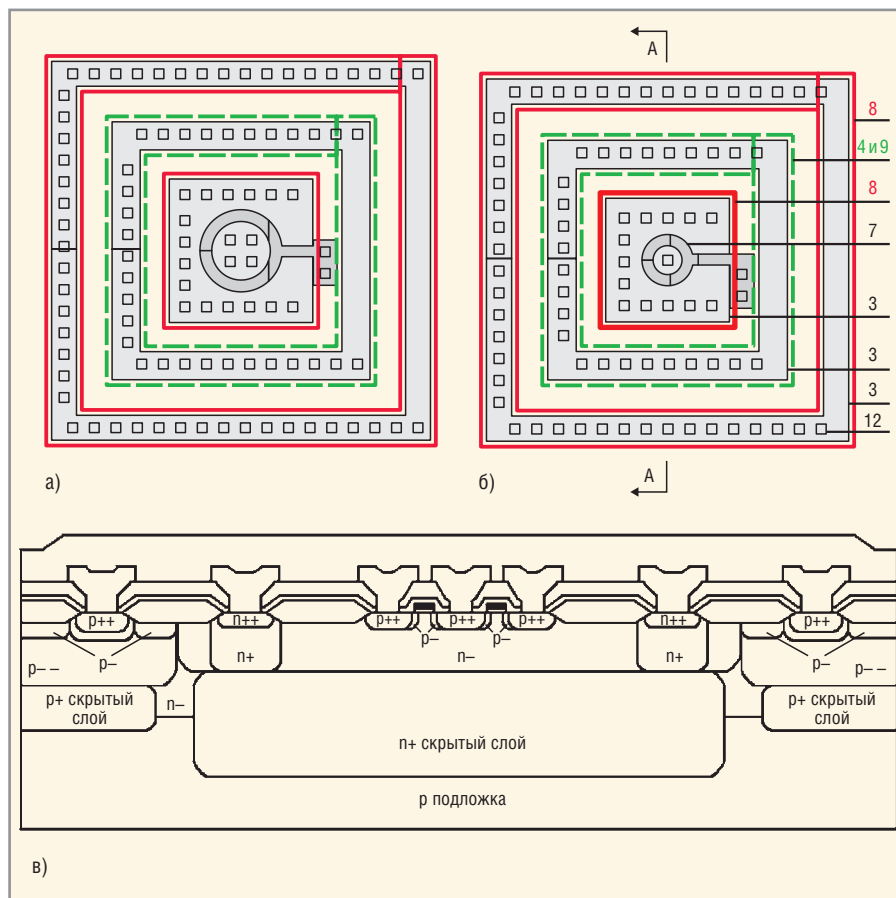


Рис. 7. Эскиз топологии (а, б) и разрез (в) конструкции горизонтального p-n-p-транзистора с базовой областью, покрытой затвором

3 - разделение (вне слоя 3 - локальный окисел), 4 - глубокий p+-коллектор, 7 - ПКК затвор, 8 - p+-исток, 9 - p+-исток, 12 - контакты

ионизацию и инжекцию «горячих» носителей в окисел.

Разработанная конструкция (см. рис. 7) обладает рядом особенностей:

- прикладываемая потенциал к затвору относительно базы p-n-p-транзистора, можно установить режим обогащения или обеднения основными носителями приповерхностных областей базы и эмиттера;
- поскольку концентрация примеси в эмиттере (p+-исток с  $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) значительно больше, чем в базе (n-карман с  $1,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), то в режиме обеднения базы (на затворе – отрицательный потенциал) концентрация основных носителей в эмиттере практически не изменяется. При этом возрастает коэффициент инжекции эмиттерного перехода и максимальная величина  $\beta$ ;
- в режиме обогащения базы (к затвору приложен положительный потенциал) уменьшается протяжённость приповерхностных областей пространственного заряда, и инжектированные эмиттерным переходом дырки отталкиваются от границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> в объём по-

лупроводника. В результате уменьшается рекомбинация неосновных носителей заряда и увеличивается  $\beta$  в микрорежиме;

- влияние работы выхода ПКК-затвора приводит к обеднению приповерхностных областей базы и увеличению  $\beta$  даже при отсутствии потенциала на затворе («плавающий» затвор);
- подавая на затвор отрицательный потенциал, возможно компенсировать действие положительного заряда окисла;
- тонкий окисел, покрывающий базу, ограничивает положительный заряд, который может генерироваться гамма-излучением.

При проектировании горизонтальных p-n-p-транзисторов необходимо учитывать влияние на их характеристики топологии и параметров применяемых полупроводниковых слоёв. Прямосмещённый эмиттерный переход p-n-p-транзистора инжектирует неосновные носители во все стороны, при этом носители, инжектированные боковой поверхностью, в основном собираются кол-

латорной об ластью, а нос ители, инжектированные донной поверхностью эмиттерного перехода, диффундируют вглубь базы, отражаются электрическим полем n+ скрытого слоя и либо собираются коллектором, либо рекомбинируют в базе. Эффективность собирания коллектором носители й, от ражённных n+ скрытым слоем, зависит от толщины высокоомной части базы р– п–р-транзистора (от эмиттерного перехода до скрытого слоя), но в любом случае для увеличения β необходимо уменьшать пло щадь донн ой ч асти эмиттерного перехода.

Отношение площади донной части эмиттера ( $S_{ED}$ ) к боковой ( $S_{EB}$ ) составляет:

$$\beta \sim \frac{S_{EB}}{S_{ED}} = \frac{x_{JE} P_E}{S_{ED}} \approx \frac{4 x_{JE}}{D_E}, \quad (4)$$

где  $P_E, D_E$  – периметр и диаметр эмиттера,  $x_{JE}$  – глубина залегания эмиттерного перехода. Таким образом, для увеличения β следует увеличивать глубину залегания эмиттерного перех ода и уменьшать диаметр эмиттера.

Для применения в аналоговых схемах важно обеспечение высокого малосигнального выходного сопротивления  $r_{OUT}$ , граничной частоты  $f_T$ , работоспособности транзисторов в области больших коллекторных токов, которые для р– п–р-транзисторов характеризуются следующими параметрами [24]:

$$r_{OUT} \approx \frac{VAF}{I_C}, \quad (5)$$

$$f_T \approx \frac{1}{2\pi TF}, \quad (6)$$

$$VAF = \frac{Q_{BO}}{C_{JCO}} \sim N_{DB} W_{BA} d_C, \quad (7)$$

$$TF \approx \frac{W_{BA}^2}{2D_{PB}}, \quad (8)$$

$$IKF = \frac{Q_{BO} S_{EB}}{TF} \approx \frac{q N_{DB} W_{BA} P_E x_{JE}}{TF}. \quad (9)$$

где  $VAF$  – напряжение Эрли;  $I_C$  – коллекторный ток;  $TF$  – время пролёта неосновных носителей заряда через базу;  $Q_{BO}$  – удельная плотность заряда основных носителей в базе (на единицу площади);  $C_{JCO}$  – удельная барьерная ёмкость коллекторного перехода (на единицу площади);  $N_{DB}$  – концентрация ионизированных доноров в базе;  $W_{BA}$  – протяженность квазинейтральной области активной базы;  $d_C$  – шири-

на области пространственного заряда коллекторного р–п-перехода;  $D_{PB}$  – коэффициент диффузии дырок в базе;  $IKF$  – ток «излома», соответствующий коллекторному току, при котором β снижается на 50% от своего максимального значения;  $q$  – заряд электрона.

На основе соотношений (4) – (9) спроектирована топология нескольких горизонтальных р– п–р-транзисторов (см. рис. 7) с базовой об ластью, покрытой затвором, а именно:

- транзистор с минимально возможными диаметром эмиттера  $D_E = 2,64$  мкм и топологической шириной базы  $W_B = 1,0$  мкм (см. рис. 7б) для получения максимальных β и  $f_T$  в соответствии с (4), (6) и (8);
- транзистор с  $D_E = 2,64$  мкм и  $W_B = 2,0$  мкм для увеличения выходного малосигнального сопротивления в соответствии с (5), (7) за счёт уменьшения β и  $f_T$ ;
- транзистор с  $D_E = 5,42$  мкм и  $W_B = 1,0$  мкм (см. рис. 7а) для увеличения максимально возможного рабочего тока в соответствии с (9) по сравнению с конструкцией рис. 7б;
- транзистор с  $D_E = 5,42$  мкм и  $W_B = 2,0$  мкм.

Транзисторы с толщиной базы  $W_B = 2,0$  мкм целесообразно применять в цепях, работающих с постоянными или низкочастотными сигналами, особенно в «токовых зеркалах».

Круглая форма эмиттера, в отличие от квадратной, обеспечивает равномерную толщину активной базы без угловых участков с повышенной напряжённостью электрического поля, которые обычно являются причиной уменьшения β и пробивного напряжения.

В [22] приведены результаты экспериментальных исследований влияния гамма-облучения на параметры горизонтального р–п–р-транзистора с базовой областью, покрытой затвором. Транзистор изготовлен с помощью технологического маршрута 0,8 мкм Би-КМОП фирмы Austria mikro system, который обеспечивает основные параметры структуры, практически идентичные техпроцессу 0,8 мкм Би-КМОП, а именно: толщину подзатворного окисла 20 нм, концентрацию примеси в базе  $2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, в р+-эмиттере –  $1 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, минимальную толщину продольной базы n-типа 0,65 мкм.

Воздействие гамма-излучения привело к незначительному увеличению положительного заряда в подзатвор-

ном окисле, но к существенному росту скорости поверхностной рекомбинации, поэтому для предотвращения изменения β при радиационном воздействии на затвор следует подавать положительный потенциал, отталкивающий от поверхности неосновные носители, инжектированные эмиттерным переходом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее перспективным видом реализации сложных микроэлектронных устройств для работы в условиях радиационного воздействия является «система в корпусе». Высококачественные аналого-цифровые компоненты СВК рекомендуется создавать с помощью технологического маршрута изготовления биполярных и КМОП-транзисторов с минимальной проектной нормой 0,8 мкм, позволяющего формировать малочувствительные к радиационному облучению п–р–п-транзисторы и полупроводниковые резисторы на основе р-базовой области.

Конструкции п-МОП- и р-п–р-транзисторов необходимо модернизировать. Целесообразными топологическими решениями, повышающими радиационную стойкость, являются п-МОП-транзисторы с р+-охранными кольцами (см. рис. 5б), с замкнутым затвором (см. рис. 5а), а также горизонтальный р–п–р-транзистор с базовой областью, покрытой затвором (см. рис. 7).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бумагин А. и др. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства. Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2010. № 1.
2. Басаев А. и др. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция. Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2009. № 8.
3. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением – взболтать. Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2007. № 7.
4. Данилин Н.С. и др. Системы в корпусе. Магистральный путь развития ЭКБ для авиации, космоса и ВПК. Системотехника. 2010. № 8.
5. Горлов М. и др. Конструктивно-технологические особенности проектирования радиационно-стойких интегральных схем операционных усилителей. Электронные компоненты. 2007. № 3.

6. *Агаханян Т.* Широкополосные усилители с повышенной радиационной стойкостью. Компоненты и технологии. 2007. № 2.
7. *Дворников О.В.* и др. Импортзамещающие практические разработки и проекты ИС на базе радиационно-стойкого АБМК. Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем. ИППМ РАН, 2006.
8. *Немудров В.* и др. Системы-на-кристалле. Техносфера, 2004.
9. *Дворников О.* и др. Выбор параметров и режимов работы МОП-транзисторов при схемотехническом моделировании аналоговых ИР-компонентов Часть 1: Критерии качества МОП-транзисторов для аналоговых применений. Современная электроника. 2009. № 9.
10. *Чернышев А.А.* Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Радио и связь, 1988.
11. *Вологдин Э.Н.* и др. Радиационная стойкость биполярных транзисторов. <http://foet.miem.edu.ru>.
12. *Устюжанинов В.Н.* и др. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. Радио и связь, 1989.
13. *Вологдин Э.Н.* и др. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость. <http://foet.miem.edu.ru>.
14. *Вологдин Э.Н.* и др. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов. <http://foet.miem.edu.ru>.
15. *Прибыльский А.В.* Конструктивно-схемотехнические методы проектирования, тестирования и контроля интегральных схем. Минск: ОСПИ, 2003.
16. *Старченко Е.И.* Особенности схемотехники операционных усилителей, стойких к воздействию потока нейтронов. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003.
17. *Прокопенко Н.Н.* Архитектура аналоговых микросхем с повышенной стабильностью нулевого уровня в условиях температурных и радиационных воздействий. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. ФГУП «НПП «Пульсар», 2009.
18. *Прокопенко Н.Н.* Способ повышения стабильности нуля комплементарных дифференциальных усилителей в условиях температурных и радиационных воздействий. Ульяновск: УлГТУ, 2009.
19. Методы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем НПО «Интеграл», предназначенных для условий работы в космических летательных аппаратах. <http://www.bms.by/RUS/GENERAL/news/1.pdf>.
20. *Anelli G.* et al. Radiation Tolerant VLSI Circuits in Standard Deep Submicron CMOS Technologies for the LHC Experiments: Practical Design Aspects. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999. Vol. NS-46. No 6.
21. *Snoeys W.* et al. Layout techniques to enhance the radiation tolerance of standard CMOS technologies demonstrated on a pixel detector readout chip. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2000. Vol. A439.
22. *Cazenave P.* et al. Total dose effects on gate controlled lateral pnp bipolar junction transistors. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. NS-45. No 6.
23. *Дворников О.В.* и др. Заявление № 20100003 от 06.04.2010 о выдаче свидетельства Республики Беларусь на топологию интегральной микросхемы. Радиационно-стойкие транзисторы.
24. *Дворников О.* и др. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1: Расчёт Spice-параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров. Современная электроника. 2009. № 5.

