

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 осуществляют 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 аналогово-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 передаточную проводимость (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 надёжным и дешёвым способом.

Применение СвК позволяет обеспечить [4]:

- значительное увеличение выполняемых функций в единицу объёма и веса;
- снижение энергопотребления;
- создание уникальных аналогов цифровых систем;
- значительное уменьшение себестоимости 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 (ПТП), 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–SiO₂ при большой величине поглощённой дозы.

Захваченный ловушками в окисле положительный заряд индуцирует отрицательный заряд в кремнии на границе раздела Si–SiO₂, 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^+ , захваченного ловушками в окисле на границе раздела (на единицу площади, см⁻²), составляет:

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

где $D\gamma$ – поглощённая доза гамма-излучения в рад; T_{Ox} – толщина окисла в мкм; P_T – 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–SiO₂. 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]:

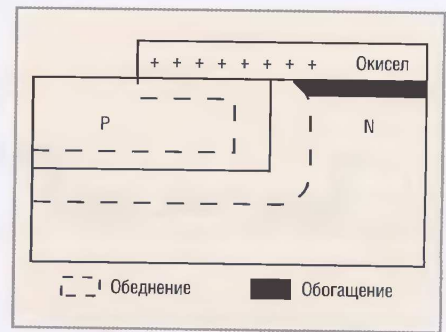


Рис. 1. Влияние положительного заряда окисла на p–n-переход

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

где I_D – ток стока, β – удельная крутизна передаточной характеристики, V_{GS} – напряжение затвор–исток, V_{TH} – пороговое напряжение.

Следовательно, точка пересечения кривой $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$ с осью V_{GS} характеризует пороговое напряжение V_{TH} , 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_{TH} , вплоть до появления в транзисторе встроенного канала (изменение полярности напряжения, соответствующего точке пересечения кривой $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$ с осью V_{GS}).

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-

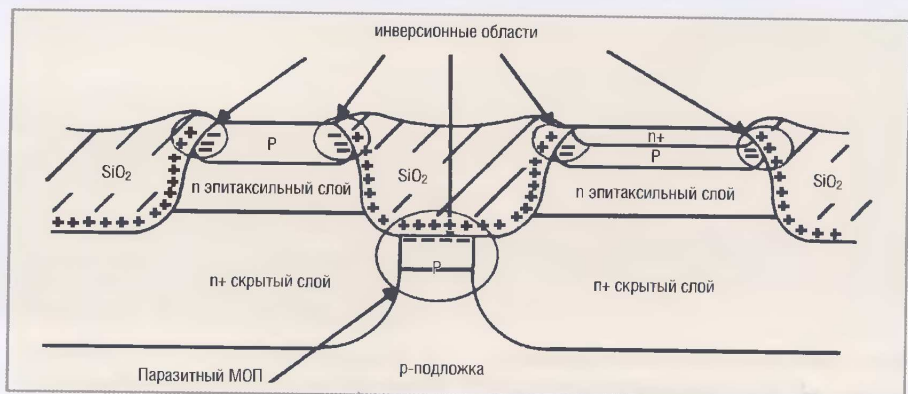


Рис. 2. Области появления инверсионных каналов под воздействием гамма-излучения [10]

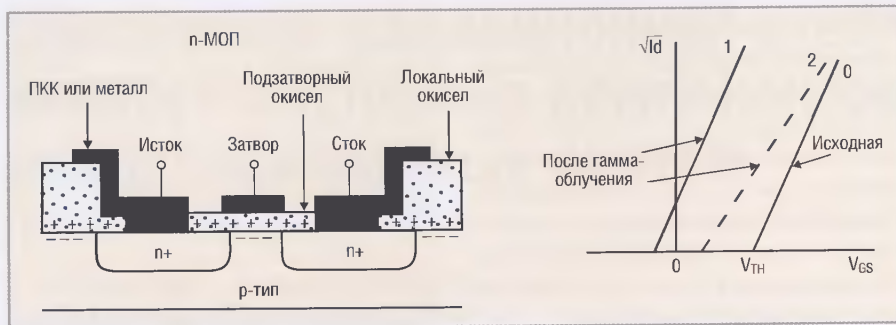


Рис. 3. Влияние гамма-излучения на кремниевый n-МОП-транзистор и его характеристики [10]

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

Величина изменения (сдвига) порогового напряжения ΔV_{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]:

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

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

- пороговое напряжение как n-МОП, так и p-МОП-транзисторов уменьшается при малых поглощённых дозах, при больших поглощённых дозах пороговое напряжение p-МОП продолжает уменьшаться, а n-МОП 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-МОП-транзисторах

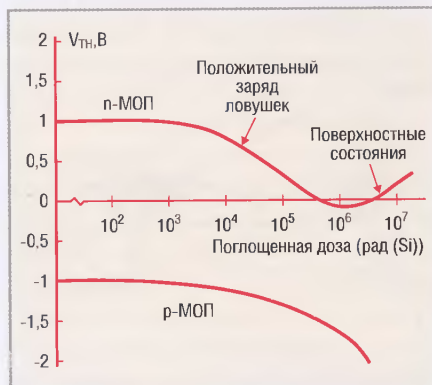


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения от поглощенной дозы гамма-излучения кремниевых МОП-транзисторов [10]

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 (β) биполярных транзисторов (БТ) уменьшается. Если на БТ воздействует низкоэнергетическое излучение, то спад β 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]. Эти 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 β , 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 исчезают выпрямительные свойства диода;

- изменение параметров МОП- и ПТП-транзисторов незначительно.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОСХЕМ, МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К РАДИАЦИОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Существенно увеличить радиационную стойкость микросхем возможно путём применения известных схемотехнических 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-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-МОП-транзисторов формировать сильнолегированные охранные 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 ПТП, применённый при изготовлении базового матричного кристалла типа АБМК_1_3 [7]. Сильнолегированные p+-резисторы, ПТП 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-п-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 $d = 0,14$ мкм (т.н. слой ПКК3 в технологическом маршруте);
- кольцевые горизонтальные р-п-п-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+-резисторы;

- резисторы в слое ПКК2 (затвор МОП-транзисторов);

- конденсаторы с различными удельной и паразитной емкостями и диэлектриком между обкладками в виде Si_3N_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 ± 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 β 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 слоевое сопротивление ($R_s = 2,4 \text{ кОм/квadrat}$) 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

ЧЁТКО БЕЗОПАСНО ЯСНО

Электролюминесцентные дисплеи Planar® – **ИДЕАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ** для отображения данных в медицине, промышленной автоматизации, на транспорте, в военных системах

- Низкий уровень электромагнитного излучения
- Устойчивость к ударным и вибрационным воздействиям
- Расширенный диапазон рабочих температур от -60 до +65°C (модель EL640.480AM8ETL)
- Высокая контрастность изображения
- Широкий угол обзора >160°
- Время отклика <1 мс
- Среднее время безотказной работы до 100000 ч
- Высокая параметрическая устойчивость: более 75% первоначальной яркости сохраняется после 10 лет эксплуатации



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ PLANAR

PROSOFT®

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru

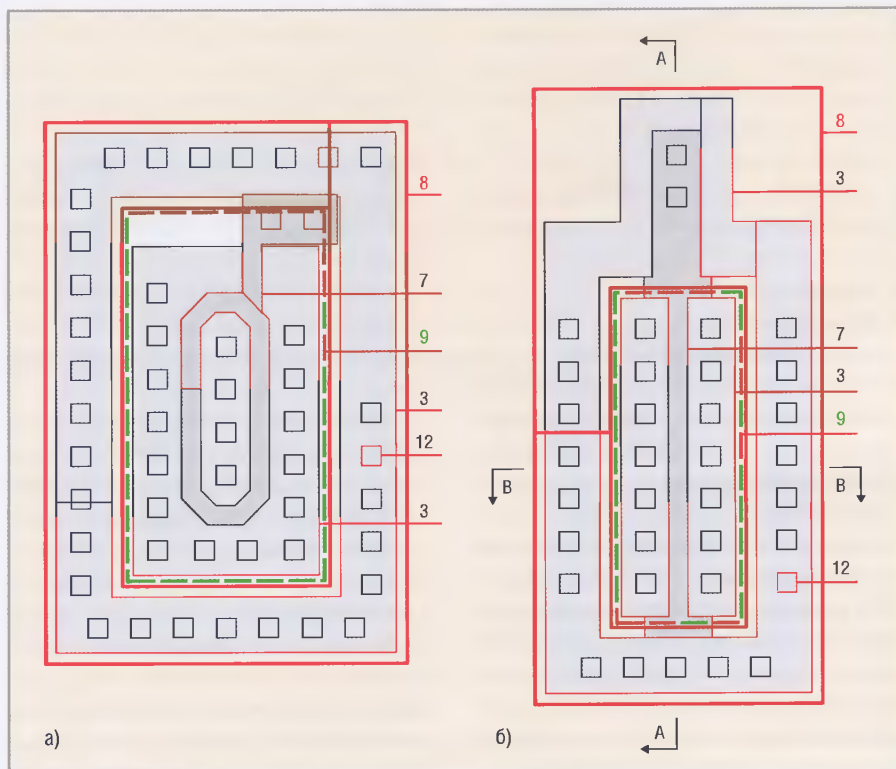


Рис. 5. Эскиз топологии n-МОП-транзисторов

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

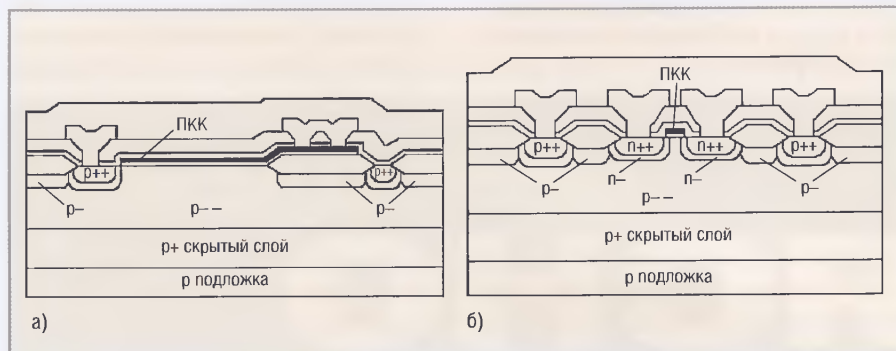


Рис. 6. Разрез конструкции n-МОП-транзистора, показанного на рис. 5б

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-МОП-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 МОП-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 МОП-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, радиа-

онные изменения β 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-МОП и горизонтального p-n-p- транзисторов. Например, адаптировать к применяемому техмаршруту известные конструкции [19–22] n-МОП-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 сток-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-МОП-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-n-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 каскадов 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 β и граничной частоты. Слаболегированные области стока и истока, перекрывающие эмиттер и коллектор, предотвращают ударную

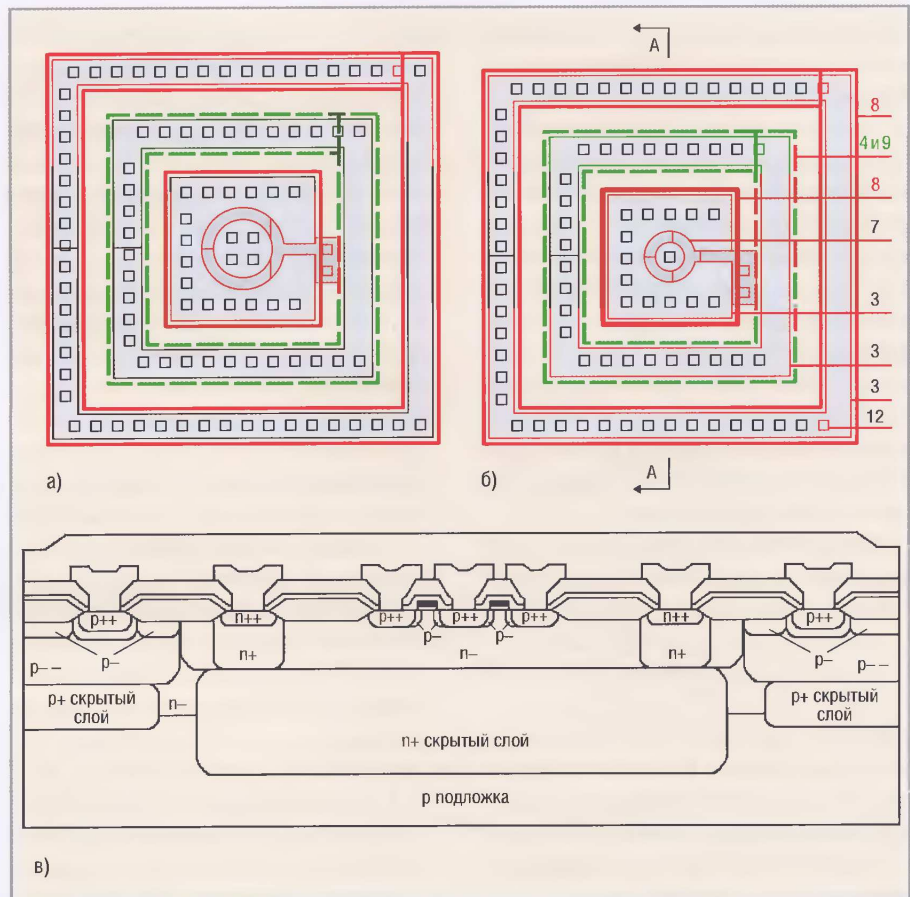


Рис. 7. Эскиз топологии (а, б) и разрез (в) конструкции горизонтального p–n–p-транзистора с базовой областью, покрытой затвором

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

ионизацию и инжекцию «горячих» носителей в окисел.

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

- прикладывая 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 β ;
- 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–SiO₂ в объём по-

лупроводника. В результате уменьшается рекомбинация неосновных носителей заряда и увеличивается β в микрорежиме;

- влияние работы выхода ПКК-затвора приводит к обеднению приповерхностных областей базы и увеличению β 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 областью, а носители, 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 носителей, отражённых n^+ -скрытым слоем, зависит от толщины высокоомной части базы p - n -транзистора (от эмиттерного перехода до скрытого слоя), но в любом случае для увеличения β необходимо уменьшать площадь донной части 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 перехода 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 p - n - p -транзисторов характеризуются следующими параметрами [24]:

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

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

$$V_{AF} = \frac{Q_{B0}}{C_{JCO}} \sim N_{DB} W_{BA} d_C, \quad (7)$$

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

$$IKF = \frac{Q_{B0} S_{EB}}{TF} \approx \frac{q N_{DB} W_{BA} P_E x_{JE}}{TF}. \quad (9)$$

где V_{AF} – напряжение Эрли; I_C – коллекторный ток; TF – время пролёта неосновных носителей заряда через базу; Q_{B0} – 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 p - n -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 p - n - p -транзисторов (см. рис. 7) с базовой областью, 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 p - n - p -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 $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в p^+ -эмиттере – $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 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 микросистемных 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 p - n - p -транзисторы и полупроводниковые резисторы на основе p -базовой области.

Конструкции n -МОП- и p - n - p -транзисторов необходимо модернизировать. Целесообразными топологическими решениями, повышающими радиационную стойкость, являются n -МОП-транзисторы с р+-охранными кольцами (см. рис. 5б), с замкнутым затвором (см. рис. 5а), а также горизонтальный p - n - p -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. Басаева А. и др. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция. Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2009. № 8.
3. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением – изобретать. 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. Импортозамещающие 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 IP-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. Устожанинов 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 методах 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 комбинированных 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. Snoey's 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 топовую интегральную микросхему. 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.





ЖК-дисплеи



industrial solutions
flatpanel technology

Предназначены для работы в жёстких условиях

Основные области применения

- Транспорт (автомобильный и железнодорожный)
- Военно-промышленный комплекс
- Морской флот
- Промышленное машинное оборудование
- Информационные терминалы



Общие технические характеристики

- Модели ЖК-дисплеев с размерами по диагонали 10,4", 10,5", 12,1", 15"
- Яркость до 1600 кд/м²
- Контрастность до 950:1
- Эффективная система подсветки на люминесцентных лампах с холодным катодом
- Интерфейс LVDS
- Диапазон рабочих температур -31...+85°C (модель 100i.10X-XT)

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ I-SFT

ProSoft®

Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru