

УДК 621.382

Радиационно-стойкое проектирование высокопроизводительных нанометровых КМОП СБИС «система-на-кристалле»¹

Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В.,
Петричкович Я. Я., Солохина Т. В.

Научно-производственный центр
«Электронные вычислительно-информационные системы»
проезд № 4922, д. 4, стр. 2. г. Москва, Зеленоград, 124498
market@elvees.com, YGerasimov@elvees.com

Получено: 18 марта 2019 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2019 г.

Принято к публикации: 25 апреля 2019 г.

Аннотация: Проанализировано влияние доминирующих радиационных эффектов в КМОП ИС и СБИС объемного кремния на их электрические параметры и характеристики. Рассмотрено влияние масштабирования и электрических режимов работы приборных и паразитных *n*-МОП транзисторов на параметры радиационной стойкости. Получила развитие методология радиационно-стойкого проектирования КМОП СБИС типа «система-на-кристалле» (SnK) и ОЗУ, разрабатываемых для изготовления по глубоко субмикронным и нанометровым технологиям объемного кремния уровня 250—90 нм и менее. Предложены технические решения, обеспечивающие повышенный уровень дозовой стойкости, сбоеустойчивости и отсутствие эффекта «защелкивания» паразитных *p*-*n*-*p* структур. Создана среда проектирования высокопроизводительных радиационно-стойких СБИС SnK и ОЗУ, содержащая библиотеки элементов и сложно-функциональные (СФ) блоки. Базовые технические решения аттестованы на специальных тестовых кристаллах и в составе разработанных СБИС.

Ключевые слова: КМОП транзисторы, СБИС «система-на-кристалле», радиационная стойкость, радиационно-стойкое проектирование, библиотека элементов, СФ-блоки, одиночные события, эффект «защелкивания».

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 9—15 сентября 2018 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. Радиационно-стойкое проектирование высокопроизводительных нанометровых КМОП СБИС «система-на-кристалле» // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 33—51.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Герасимов, Ю. М. Радиационно-стойкое проектирование высокопроизводительных нанометровых КМОП СБИС «система-на-кристалле» / Ю. М. Герасимов, Н. Г. Григорьев, А. В. Кобыляцкий, Я. Я. Петричкович, Т. В. Солохина // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 33—51.

Radiation-Hardening-By-Design of the High-Performance CMOS Nanometer System-on-chip

Yuriy M. Gerasimov, Nikolay G. Grigoryev, Andrey V. Kobylatskiy,
Yaroslav Ya. Petrichkovich, and Tatiana V. Solokhina

*RnD Center “ELVEES”, JSC
Proyezd 4922, str.2 Moscow, Zelenograd, Russia, 124498
market@elvees.com, YGerasimov@elvees.com*

Received: March 18, 2019

Peer-reviewed: April 15, 2019

Accepted: April 25, 2019

Abstract: *The influence of the dominant radiation effects in bulk CMOS IC and VLSI on their electrical parameters and characteristics is analyzed. The effects of scaling and electrical modes on device and parasitic n-MOS transistors on the radiation hardness parameters are considered. The methodology of radiation-hardening-by-design of system-on-chip (SoC) and SRAM was developed for the 250—90 nm bulk CMOS processes. Technical solutions are proposed that provide an increased level of total ionizing dose tolerance, failure tolerance, and the absence of the latch-up effect. The framework for high-performance radiation-hardened SoC and SRAM design, containing standard cell libraries and IP-blocks, has been created. Basic technical solutions are certified on special test chips and as part of developed VLSI.*

Keywords: *CMOS transistors, system-on-chip, radiation hardness, radiation-hardening-by-design, standard cell library, IP-block, single event effects, latch-up.*

For citation (IEEE): Yu. M. Gerasimov et al. “Radiation-Hardening-By-Design of the High-Performance CMOS Nanometer System-on-chip,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 33—51, 2019. (In Russ). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.04

1. Введение

За последние 50 лет КМОП технология прошла путь от минимальных топологических проектных норм 10 мкм до норм 14—7 нм, к 2020—2021 годам ожидается достижение уровня 5 нм и менее [1, 2]. В настоящее время глубоко субмикронные и нанометровые (суб-100 нм) **КМОП технологии объемного кремния (ОК)** уровня 180—65 нм являются наиболее доступными, дешевыми и привлекательными для создания высокопроизводительных СБИС типа «система-на-кристалле» (СнК) [3]. В России освоены КМОП технологии объемного кремния уровня 180 нм и 90 нм, осваивается технология уровня 65 нм, в перспективе возможно появление технологии уровня 28 нм. Данные технологии в ближайшее десятилетие будут базовыми для создания высокопроизводительной, в частности, радиационно-стойкой ЭКБ для аэрокосмических применений.

Современные глубоко субмикронные и нанометровые КМОП СБИС СнК (далее **нано-СБИС**) содержат сотни миллионов-миллиарды транзисторов на кристалле, как минимум одно процессорное ядро и большой объем блоков памяти различных типов и строятся на основе стандартных библиотек элементов (БЭ) и аттестованных сложно-функциональных (СФ) блоков (в зарубежной терминологии — IP-block), передаваемых разработчикам на языке высокого уровня («Soft»), в виде логической схемы («Firm») или топологической конструкции («Hard») [3].

По имеющимся в настоящее время отечественным и зарубежным данным представляется возможным использовать КМОП нано-СБИС в аппаратуре, работающей при воздействии уровней радиации, характерных для космических аппаратов, авиационной техники и различных гражданских применений.

Современные коммерческие КМОП нанотехнологии **объемного кремния** позволяют с использованием методов радиационно-стойкого проектирования (РСП) — в зарубежной терминологии Radiation-Hardening-by-Design — обеспечивать повышенный уровень радиационной стойкости (РС) СБИС, соответствующий категории «2» [4] (в зарубежной терминологии класс «Space», Radiation Tolerant).

Радиационно-стойкое проектирование представляет собой совокупность архитектурных (структурных), схемотехнических и конструктивно-топологических методов проектирования РС нано-СБИС на основе дополненных стандартных правил проектирования с использованием современных средств САПР и интеллектуальных возможностей разработчика без вмешательства в технологический процесс (Fabless) [1, 5].

Основная задача РСП nano-CBIS — достижение предельных возможностей технологии по радиационной стойкости на всех этапах их разработки. В результате, уровень РС таких CBIS существенно зависит не только от особенностей технологии изготовления, но и от наличия необходимой среды проектирования (в частности, специальных библиотек элементов и СФ-блоков), квалификации разработчиков, стиля и качества проектирования.

Применение тех или иных технических решений при РСП существенно зависит от особенностей проявления различных физических эффектов при радиационном воздействии в базовых конструктивно-топологических структурах nano-CBIS, уровня интеграции, а также от требований к электрическим параметрам и критериям РС.

2. Масштабирование и радиационные эффекты в КМОП микросхемах

Совершенствование КМОП технологий, неуклонное уменьшение проектных норм (масштабирование) и рост числа элементов на кристалле существенно влияют на все параметры CBIS, в частности, и на радиационную стойкость. Степень доминирования различных радиационных эффектов, их влияние на функционирование и параметры КМОП микросхем существенно зависит от уровня технологии (проектных норм). При масштабировании размеров элементов в CBIS масштабируются и параметры, от которых зависит их РС. В таблице 1 приведены классические правила масштабирования размеров элементов, напряжения питания и концентрации примеси в подложке, а также параметров приборных МОП транзисторов (МОПТ) влияющих на их РС, где χ — проектная норма, $\chi_0 = 0,5 \text{ мкм}$, $\lambda = \chi/\chi_0 < 1$ — коэффициент масштабирования [1, 9]. Данные правила сохраняются до норм 100—65 нм, где в качестве подзатворного диэлектрика используются двухслойные $\text{SiO}_2/\text{high-}k$ диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью [6], а напряжение питания поддерживается на уровне $(1,1 \pm 0,1) \text{ В}$.

В таблице 2 приведены параметры подзатворного диэлектрика приборных МОПТ для КМОП технологий различного уровня. Эффективная толщина приведена для случая двухслойного диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$.

Таблица 1. Масштабирование размеров и параметров CBIS

Классические параметры масштабирования ($\chi < 0,5 \text{ мкм}$)	Правило ($\lambda < 1$)
Минимальные геометрические размеры (W, L, x_i)	λ
Подзатворный диэлектрик SiO_2 приборных МОПТ — $t_{\text{ок}}$	λ
Напряжение питания ($1,0\text{В} < U_{\text{ин}} < 5,0\text{В}$)	λ
Концентрация примеси в подложке — $N_{\text{п}}$	$1/\lambda$

Приборные и конструктивные параметры		
Ток приборного транзистора ($W/L = \text{const}$) — I_0		λ
Нормированный ток утечки транзистора — I_{yT0} / I_0		$1/\lambda - 1/\lambda^2$
Асимптотическая задержка переключения — t_a		λ
Нормированное начальное пороговое напряжение транзистора — $U_{\text{пор}}/U_{\text{ин}} \approx (0,2 \text{—} \approx 0,3)$		~ 1
Нормированное изменение порогового напряжения при облучении — $\Delta U_{\text{пор}}/U_{\text{ин}}$ (при $\chi \leq 0,25$ мкм $\Delta U_{\text{пор}}/U_{\text{инт}} \approx 0$)		λ
Емкость в узле — C_i		λ
Критический заряд в узле — $Q_i \approx U_{\text{ин}} \times C_i$		λ^2
Эффективная длина собирания носителей — L_{eff}		λ
Пороговое значение ЛПЭ — $LET_0(E_0) = Q_i / L_{\text{eff}}$		$\sim \lambda$
Относительное сечение насыщения — $\sigma_{\text{нас}}/\text{бит}$		λ^2

Таблица 2. Подзатворные диэлектрики в КМОП ИС и СБИС

Проектная норма, нм	Подзатворный диэлектрик		Изолирующий окисел	Уровень технологии
	Эффективная толщина, нм	Тип		
10—1 мкм	120 — 10	SiO ₂	Locos (SiO ₂)	Микронный
800—500	8 — 6	SiO ₂		Субмикронный
350	< 6 — 7	SiO ₂		
250	5	SiO ₂	STI (SiO ₂) h= (450 — 300) нм w=150 нм	Глубоко субмикронный
180	3,2	SiO ₂		
130	2,0	SiO ₂		
100—90	1,2/3,0 (1,8)*	SiO ₂ /high-k		Нанометровый (суб-100 нм)
65	1,0/2,6 (1,5)*	SiO ₂ /high-k		
40	0,8/2,4 (1,3)*	SiO ₂ /high-k		

* эффективная толщина для SiO₂/HfO₂

3. Виды нарушения работоспособности в субмикронных СБИС

В таблице 3 показана степень влияния различных доминирующих радиационных эффектов на функционирование и параметры микросхем, изготавливаемых по КМОП технологиям с различными проектными нормами.

Влияние радиационных эффектов на работоспособность и параметры микросхем существенно зависит не только от уровня и особенностей технологии изготовления, но и от степени интеграции, их архитектурных, схематехнических и конструктивно-топологических особенностей.

Наличие паразитных р-п-р-п тиристорных структур присуще КМОП технологии объемного кремния. Данные структуры в зависимости от уровня технологии могут «зашелкиваться» (переключаться в проводящее состояние) как в нормальных условиях, так и при воздействии мощного ионизирующего излучения, тяжелых заряженных частиц, высокоэнергетичных протонов и нейтронов (ТЧ) [7, 8]. Это приводит к существенному возрастанию тока потребления микросхемы, и, если не применять специальных мер, — к катастрофическим отказам. Однако, в нано-СБИС наличие эпитаксиального слоя и большая концентрация примеси в подложке приводят к тому, что данный эффект проявляется при больших мощностях ионизирующего облучения и энергиях ТЧ чем в микронных и субмикронных СБИС.

Таблица 3. Радиационные эффекты в КМОП ИС и СБИС ОК

Доминирующие радиационные эффекты	Микронные ИС 10—1 мкм	Субмикронные БИС 0,8—0,35 мкм	Глубоко субмикронные СБИС 0,35—0,13 мкм	Нанометровые СБИС SnK ≤ 0,1 мкм
«Зашелкивание» паразитных р-п-р-п структур	Существенное влияние ++	Сильное влияние +	Умеренное влияние +/-	Слабое влияние -/+
Накопление положительного ОЗ в подзатворном окисле	Существенное влияние ++	Умеренное влияние +	Несущественное влияние +/-	Нет влияния -
Образование ПС на границе Si-SiO ₂ МОПТ	Существенное влияние ++	Умеренное влияние +	Несущественное влияние +/-	Нет влияния -
Накопление положительного ОЗ в изолирующем окисле (STI)	Несущественное влияние +/-	Умеренное влияние +	Существенное влияние ++	Существенное влияние ++
Ионизационные сбои при воздействии ТЧ	Нет влияния -	Умеренное влияние +	Сильное влияние +	Существенное влияние ++

Накопление положительного объемного заряда (ОЗ) в подзатворном окисле МОП транзистора приводит к изменению его порогового напряжения ($U_{\text{пор}}$) — для р-МОПТ к возрастанию, для n-МОПТ к уменьшению, вплоть до образования встроенного канала. Наиболее существенно этот эффект проявляется в микронных МОПТ, слабее — в субмикронных. Накопленный в окисле заряд сохраняется, как правило, длительное время и отжигается только при повышенной температуре [2].

Образование быстрых поверхностных состояний (ПС) на границе раздела подзатворный окисел-полупроводник приводит к возрастанию $U_{\text{пор}}$ МОПТ обоих типов и к уменьшению их удельной крутизны (подвижности носителей в канале). Данный эффект проявляется при дозах существенно бóльших, чем накопление заряда в объеме диэлектрика (более 300—500 крад в зависимости от особенностей технологии).

Накопление ОЗ и образование ПС проявляются в виде:

- нарушения функционирования, в частности, при $U_{\text{порр}} > U_{\text{ип}} - U_{\text{пом}}$,
- существенного возрастания тока потребления, при образовании встроенного канала у n-МОПТ ($U_{\text{порн}} < 0$);
- изменения логических уровней и токов выходных каскадов,
- снижения быстродействия до уровня ниже допустимого.

В микронных и субмикронных КМОП технологиях проблемы повышения РС в свое время решались исключительно конструктивно-технологическими методами, в частности, путем улучшения качества и структуры подзатворного окисла и при использовании р+ и n+ охранных колец. Схемотехнические методы повышения РС из-за низкой степени интеграции БИС были ограничены и менее эффективны. Они сводились, в основном, к оптимизации размеров МОП транзисторов в элементах с учетом изменения их порогового напряжения и удельной крутизны при воздействии ионизирующего облучения [5].

4. Виды нарушения работоспособности нано-СБИС

В нано-СБИС с $t_{\text{ок}} \leq 6$ нм из-за наличия значительных туннельных токов через подзатворный диэлектрик положительный ОЗ в нем не накапливается и $\Delta U_{\text{пор}}$ приборных МОПТ пренебрежимо малы (таблица 1). Накопления заряда ПС и связанных с ним изменения $U_{\text{пор}}$ и подвижности носителей в канале МОПТ до доз, по крайней мере, 1 Мрад также не наблюдаются. В результате чего, нарушения функционирования и изменения параметров таких СБИС, в частности, быстродействия из-за этих эффектов также не наблюдаются. Это подтверждается как результатами тео-

ретических исследований [1, 2], так и результатами проведенных нами экспериментальных исследований быстродействия различных кольцевых генераторов на тестовых кристаллах для технологий уровня 250—90 нм.

В нано-СБИС основные виды нарушения работоспособности при воздействии факторов космического пространства связаны с дозовыми эффектами (Total-Ionizing-Dose — TID) и одиночными событиями (Single-Event-Effects — SEE) от ионизации высокоэнергетичными ТЧ.

Воздействие ионизирующего облучения приводит в нано-СБИС к возрастанию статического тока потребления из-за токов утечек паразитных n-МОП структур при накоплении положительного заряда в изолирующем окисле и возможному при этом нарушению функционирования из-за «просадки» напряжения на шинах питания.

Наиболее важными ионизационными одиночными событиями, возникающие при воздействии ТЧ на чувствительные области элементов СБИС являются [7-9]:

— **защелкивание паразитных тиристорных структур** (Single-Event-Latchup — SEL);

— **частотно-независимые сбои** в ячейках памяти ОЗУ и триггерах (Single-Event-Upset) — SEU);

— импульсы ионизационной реакции («иголки») в элементах логических цепей и синхронизации (Single-Event-Transient — SET), приводящие к **частотно-зависимым сбоям** в триггерах.

4.1. Токи утечки в нано-СБИС

Для СБИС СнК высокой степени интеграции принципиальное значение имеют токи утечки закрытых МОПТ (напряжение затвор-подложка $U_{зп}=0$) при напряжении сток-исток $U_{си}=U_{ин}$. Все многообразие этих токов можно разделить на собственные токи, не связанные с облучением, и токи утечки паразитных n-МОПТ, возникающие при облучении из-за накопления положительного заряда в изолирующих окислах.

Собственные токи утечки в МОПТ достаточно подробно проанализированы и описаны в литературе, в частности, в [10]. Наиболее важные составляющие, учитываемые в модели МОПТ BSIM4 v4.5, показаны на рис.1, среди которых ток обратно смещенного p-n перехода сток-подложка, подпороговый ток приборного транзистора (при $U_{си}=0,1$ В), ток утечки, связанный с индуцированным стоком снижением барьера (DIBL, $U_{си}=U_{ин}$), туннельный ток утечки через тонкий подзатворный диэлектрик.

Соотношение между этими токами зависит от размеров МОПТ, концентрации примеси в подложке/кармане, толщины подзатворного диэлек-

трика и других технологических параметров и может существенно отличаться для различных проектных норм и фабрик.

При разработке техпроцессов эти токи минимизируются таким образом, чтобы они существенно не влияли на параметры и функционирование СБИС, а в СБИС с предельной степенью интеграции для данной технологии суммарный статический ток утечки (ток потребления) не превышал бы допустимую величину составляющую, как правило, несколько десятков-сотен миллиампер.

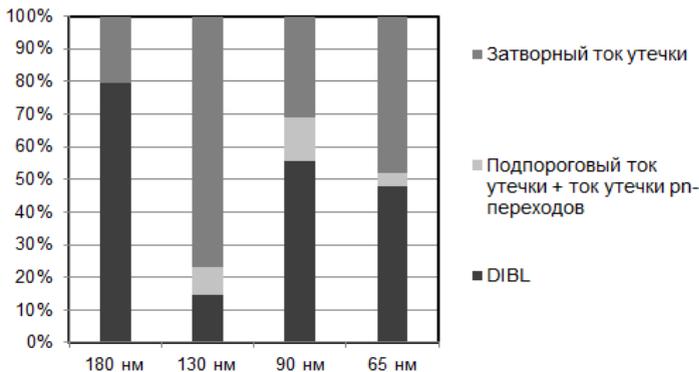


Рис. 1. Составляющие собственного тока утечки для различных технологий.

Fig. 1. Proportions of transistor current components for various processes

Токи утечки, возникающие в СБИС при воздействии ионизирующего облучения, связаны с накоплением положительного ОЗ в изолирующих LOCOS/STI структурах вдоль их границ раздела с подложкой р-типа, где образуются паразитные n-МОП транзисторы. Все возможные структуры этого типа иллюстрируется на рис. 2.

Накопление положительного ОЗ в изолирующем окисле при облучении приводит к возникновению следующих токов утечки [1, 11—13]:

— «внутритранзисторных» — между n^+ областями стока и истока приборного n-МОПТ (рис. 2а);

— «межприборных» — между областями n^+ - n^+ и n^+ - n-карман различных МОПТ (рис. 2б).

Эти суммарные токи утечки наиболее существенно проявляются в нано-СБИС высокой степени интеграции в виде значительного возрастания статического тока потребления. Однако, во всех случаях на уровне отдельных элементов отношение рабочего тока к его току утечки пренебрежимо мало ($I_{on}/I_{off} > 10^2$) и в цифровых КМОП нано-СБИС функциональных отказов не наблюдается [2].

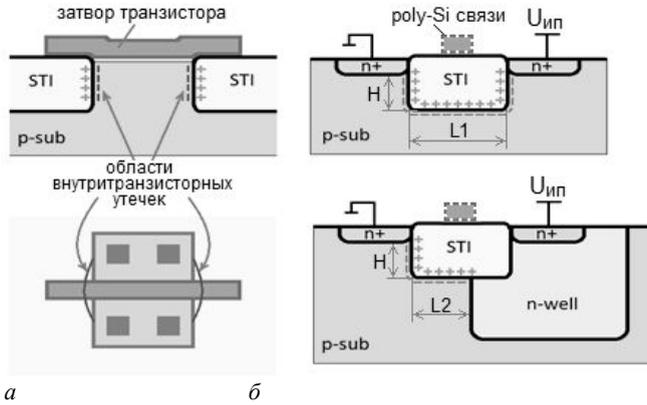


Рис. 2. Токи утечки в n-МОП структурах при облучении:
а — «внутритранзисторные», б — «межприборные».

Fig. 2. Leakage currents in nMOS structures:
а — intra-device, б — inter-device

Возможное образование ПС на границе изолирующего окисла и полупроводника при больших дозах облучения приводит к уменьшению проводимости паразитных каналов и оказывает позитивное влияние на дозовую стойкость (ток утечки уменьшается).

4.2. Электрические режимы работы и радиационная стойкость

Накапливаемый в диэлектрике заряд как в приборных транзисторах, так и в паразитных структурах существенно зависит от их электрического режима работы при облучении.

На рис. 3 приведены типовые возможные режимы работы n-МОПТ в схемах, где присутствуют напряжения на стоке и/или истоке. Режимы 2 и 4 используются в стандартных КМОП цифровых элементах, режимы 1,3 и 6 — в двунаправленных ключах и ячейках памяти (ЯП). Режим 5 в стандартных цифровых БЭ не используется, однако его использование возможно в некоторых специализированных цифро-аналоговых элементах.

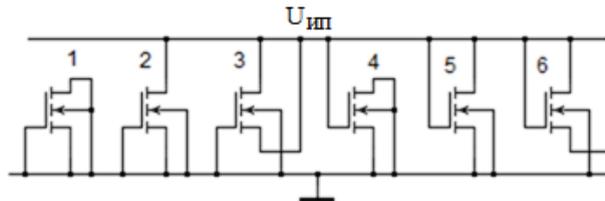


Рис. 3. Типовые режимы работы n-МОП транзистора.
Fig. 3. Typical nMOS transistor electric modes

Наличие напряжения на стоке и/или истоке МОПТ влияет на распределение потенциала вдоль его канала в результате чего напряжение затвор-канал, от которого также зависит $\Delta U_{\text{пор}}$ при облучении, также не одинаково вдоль канала. В результате искажается форма ВАХ МОП транзистора, а при изменении местами стока и истока ВАХ транзистора отличаются [2].

Для «внутритранзисторных» паразитных МОПТ структур (рис. 2а) возможны все электрические режимы, показанные на рис. 3. Однако, в отличие от приборных МОПТ, в режимах 4—6 эти транзисторные структуры, находятся в закрытом состоянии. Тем не менее, зависимость тока утечки от напряжений на затворе, стоке и/или истоке при облучении в них также наблюдается, что подтверждается, в частности, результатами исследования приведенного в [13] и показанного на рис. 4. Наихудшими являются режимы 4 и 3.

Для «межприборных» паразитных структур $n^+ - n^+$ режимы 4—6 реализуются только при наличии над STI областями поликремниевых связей (затвора), в противном случае эти режимы невозможны. Однако, учитывая, что разводка поликремния (или металла) не может покрывать всю область изолирующего окисла, между этими областями (в соответствии с правилами проектирования) влияние напряжения на этом затворе не существенно. Для структур $n^+ - n$ -карман в связи с тем, что карман всегда находится под напряжением питания $U_{\text{ип}}$, режимы 1 и 4 в реальных условиях работы невозможны.

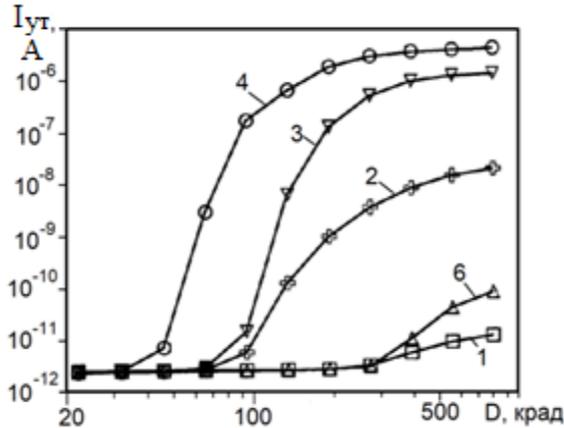


Рис. 4. Зависимость «внутритранзисторной» утечки от дозы облучения в режимах 1—4 и 6 для технологии уровня 180 нм [13].

Fig. 4. Intra-device leakage current in 180 nm bulk CMOS process as a function of the total ionizing dose in modes 1—4 and 6 [13]

В нано-СБИС токи утечки при облучении существенно зависят не только от электрического режима при облучении, но и от электрического режима при измерении, существенно отжигаются при прекращении облучения даже в нормальных условиях, а также зависят от мощности дозы (интенсивности) облучения [2, 13].

4.3. Сбои при воздействии тяжелых частиц

Механизмы формирования одиночных эффектов связаны с накоплением избыточного заряда в области пространственного заряда закрытого р-п-перехода стока/истока МОПТ при ионизации ТЧ с последующим его рассасыванием путем диффузии и дрейфа электронов, а также при возможном отпирании паразитного биполярного транзистора [1, 9, 14] (Рис.5).

Наиболее чувствительны к воздействию ТЧ — ячейки памяти (ЯП) ОЗУ, являющиеся наиболее плотноупакованными элементами СБИС. Если линейные потери энергии (LET) от ТЧ превышает энергию переключения ЯП (LET_0), происходит сбой (SEU) — ЯП переключается в противоположное состояние. Сбои в ячейках памяти (SEU) наиболее существенно проявляются в глубоко субмикронных и нанометровых СБИС, в последних они могут носить множественный характер [9, 15]. В микронных и субмикронных БИС при воздействии ТЧ возможны единичные легко корректируемые сбои.

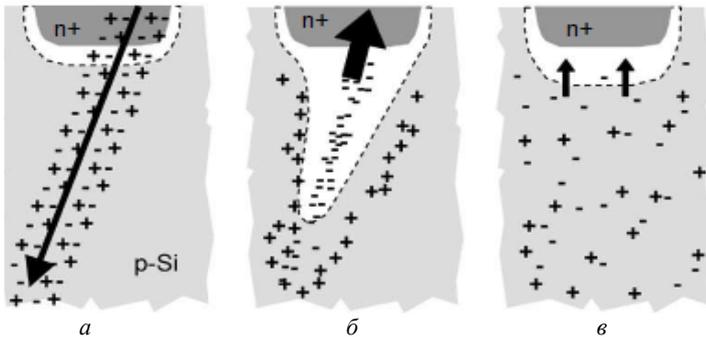


Рис. 5. Механизмы формирования одиночных эффектов при воздействии ТЧ [9]:
a — след ионизации от ТЧ, *б* — дрейфовый ток, *в* — диффузионный ток.

Fig. 5. Single event effects ionization current formation mechanism:
a — heavy particle track; *б* — drift current; *в* — diffusion current

Основная причина функциональных сбоев в логических цепях СБИС при воздействии ТЧ — кратковременные (до 1 нс) импульсы ионизационной реакции («иголки») в логических цепях (SET). Распространяясь по логическим цепям или цепям синхронизации, они могут усиливаться и

приводить к сбоям в триггерах-защелках (SEU) и полному нарушению работоспособности СБИС [16]. Наиболее существенно такие сбои проявляются в быстродействующих трактах нано-СБИС.

Попадание тяжелой частицы в активную область (сток/исток) может вызывать несколько одиночных эффектов — SEU и SET в разных участках схемы: несколько импульсов SET в логических цепях, SEU кратности N во внутренних регистрах и ячейках памяти СФ-блоков ОЗУ.

Множественные сбои в блоках памяти могут происходить в смежных ячейках, относящихся к одному (Multiple Bit Upset — MBU) или к различным словам (Multiple Cell Upset — MCU) [9, 15]. Поскольку MBU не исправляются стандартными средствами помехоустойчивого кодирования, на этапе проектирования ОЗУ структуру его накопителя (матрицы ячеек памяти) необходимо выбирать такой, чтобы в нем отсутствовали MBU (ячейки одного слова должны быть разнесены на значительное расстояние). В этом случае возможна эффективная коррекция MCU с использованием, в частности, кодов Хэмминга.

5. Методология радиационного стойкого проектирования

По мере уменьшения проектных норм, усложнения и удорожания техпроцессов, а также в связи с отсутствием изменения параметров **приборных МОПТ** при облучении акцент в повышении РС в нано-СБИС сместился на этап их разработки: радиационно-стойкое проектирование (РСП) [2, 9].

Для повышения РС нано-СБИС при их проектировании предлагает большое число архитектурных, структурных, схмотехнических и конструктивно-топологических решений [1, 2, 9, 10, 17].

Из всего многообразия технических решений РСП ниже рассматриваются наиболее эффективные для использования при разработке высокопроизводительных СБИС СнК и ОЗУ категории «2» высокой степени интеграции по **КМОП нано-технологиям объемного кремния** с незначительной аппаратной и временной избыточностью (не приводящих к существенному увеличению площади кристалла и снижению производительности), но существенно повышающие РС.

Наиболее важными при РСП являются конструктивно-топологические решения, позволяющие подавить эффект «защелкивания» (SEL) до уровня более $100 \text{ Мэв} \times \text{см}^2/\text{мг}$ и сделать СБИС нечувствительными к этому эффекту (Immune Latchup). Для этой цели достаточно в каждом элементе использовать сплошную «жесткую» [18] или разрывную «легкую» [19] **только p+ охрану вдоль границы p-подложки с n-карманом и p+ областями стоков/истоков.**

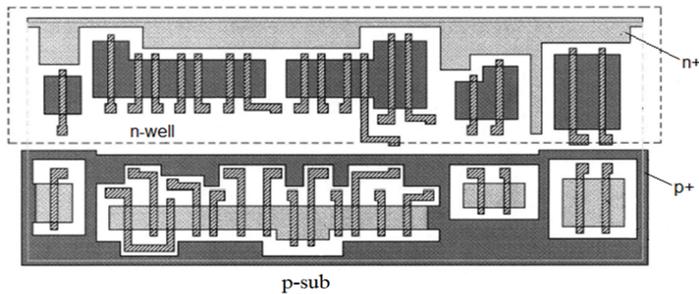


Рис. 6. Подавление эффекта «зашелкивания» и «межприборных» утечек p+ охраной.

Fig. 6. Latch-up and inter-device leakage reduction layout technique by p+ guard ring application

Пример базовой конструкции элемента со сплошной p+ охраной вдоль границы с карманом приведен на рис. 6 [17]. Такая охрана позволяет также подавить «межприборную» утечку между этими областями. Для подавления утечки между областями n+ - n+ стоков/истоков различных n-МОПТ между ними и на границах БЭ необходимо также применять сплошную p+ охрану. В ячейках памяти ОЗУ для подавления SEL необходимо делать контакты p+ к подложке и n+ к карману в каждой ЯП или группе из четырех ЯП [20]. Следует также отметить, что использование p+ и n+ охраны повышает сбоеустойчивость БЭ и ЭП.

Конструкция БЭ на рис.6 не устраняет «внутритранзисторные» утечки. Устранение данной утечки возможно при использовании конструкции с кольцевой конфигурацией затворов транзисторов [1, 9, 12, 21] и частично при использовании краевых уширений (dog bones) у n-МОПТ [12]. Библиотечные элементы на основе транзисторов с такой конфигурацией затвора занимают недопустимо большую площадь на кристалле, но могут быть эффективно использованы в ряде элементов, в частности, в ячейках памяти ОЗУ. Однако, для технологий уровня ниже 180 нм такие конструкции не допускаются правилами проектирования.

На рис. 7 в качестве примера приведены базовые слои топологии для технологии уровня 250 нм, разработанных ЯП 8Тр с кольцевыми триггерными n-МОПТ и различными конструкциями p+ охраны [21].

В таблице 4 приведен удельный ток утечки ($I_{ут}$) ЯП на рис.7, облученных в составе тестового кристалла до дозы $D = 300$ крад, а также основные параметры, характеризующие эффективность использования p+ охраны в ЯП с кольцевыми транзисторами в сравнении классической ЯП 6Тп с линейными n-МОПТ [21], где K_S — коэффициент увеличения площади ЯП, K_Q — коэффициент увеличения критического заряда в узлах ЭП, K_{eff} — коэффициент эффективности увеличения площади ЯП для повышения LET_0 .

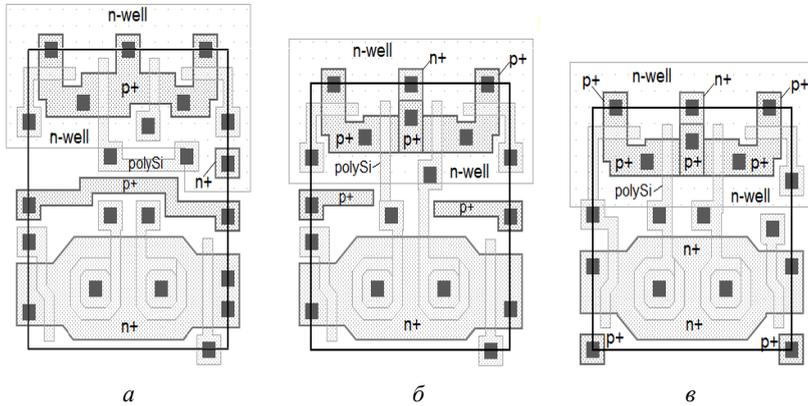


Рис. 7. Топология КМОП элемента памяти 8Тр с кольцевыми транзисторами n-типа:
 а — сплошная p+ охрана, б — частичная p+ охрана, в — p+ охрана отсутствует.
 Fig. 7. 8Тр memory cell layout with n-channel pass transistors of enclosed layout:
 а — solid p+ guard ring; б — partial p+ guard ring; в — no p+ guard ring

Таблица 4. Параметры вариантов конструкции ЯП 8Тр

Вариант ЯП	$I_{\text{ут}}$, нА/бит	$K_S = S_{8\text{T}}/S_{6\text{T}}$	$K_Q = Q_{8\text{T}}/Q_{6\text{T}}$	$K_{\text{eff}} = K_Q/ K_S$
7а	0,1	2,64	3,7	1,8
7б	20	2,33	3,7	1,7
7в	500	2,12	3,7	1,5

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что совместное использование «жесткой» p+ охраны и кольцевых n-МОПТ (Рис.7а) позволяет существенно повысить РС ко всем радиационным факторам и достигнуть предельных возможностей КМОП технологии объемного кремния по РС.

Для дополнительного уменьшения «внутритранзисторных» утечек в ЯП и БЭ эффективно также использовать технологические опции слаботекущих n-МОПТ (с высоким начальным $U_{\text{пор}}$) — НVT, а опцию SVT (с низким $U_{\text{пор}}$) использовать только в p-МОПТ.

Существенного повышения сбоеустойчивости логических цепей и цепей синхронизации можно также добиться путем увеличения абсолютных размеров элементов и оптимизации коэффициентов нагрузки в логических цепях [22].

В нано-СБИС с пониженной степенью интеграции, а также в схемах смешанного сигнала, где требования повышенной сбоеустойчивости яв-

ляются определяющими, в ряде трактов и элементов можно использовать специальные «жесткие» схемотехнические решения такие как дублирование и мажорирование элементов и функциональных узлов, SET-фильтры, DICE-триггеры и ячейки памяти ОЗУ [1, 9, 17].

6. Среда радиационно-стойкого проектирования nano-СБИС

Для доступных средств САПР разработана среда проектирования радиационно-стойких nano-СБИС для базовых КМОП технологий объемного кремния уровня 250—90 нм, включающая:

- совокупность данных и правил РСР и верификации топологии;
- аттестованные по РС на тестовых кристаллах и в составе СБИС библиотеки элементов и СФ-блоков;
- набор тестовых структур для расчетно-экспериментального прогнозирования параметров РС, выбора наилучших технических решений элементов библиотек и СФ-блоков;
- методику оптимизации параметров логических цепей по критерию сбоеустойчивость — быстродействие.

Разработаны следующие библиотеки элементов и «Hard» СФ-блоки для проектирования РС nano-СБИС категории «2»:

- универсальные стандартные и специализированные цифровые элементы;
- универсальные и специализированные (LVDS, SSTL, VML, CML) площадочные элементы;
- параметризуемые и компилируемые **СФ-блоки 1- и 2-портовой памяти и регистровые файлы** общей информационной емкостью до 128—256 кбит и разрядностью до 40, в которых невозможны множественные сбои в одном слове (MBU);
- СФ-блок программируемого синтезатора частот на основе ФАПЧ с диапазоном синтезируемых системных частот 4—600 МГц;
- СФ-блок обмена данными с памятью типа DDR2 SDRAM в стандарте JEDEC JESD79 с приёмопередатчиками интерфейса SSTL_18;
- СФ-блоки приёмопередатчиков мультипротокольных портов SpaceFibre со скоростью передачи данных 1,25—6,25 Гбит/с.

Использованные при разработке БЭ и СФ-блоков описанные выше технические решения позволили для базовых КМОП технологий объемного кремния уровня 250—90 нм обеспечить в разработанных nano-СБИС повышенный уровень дозовой стойкости и сбоеустойчивости, а также отсутствие катастрофических отказов в виде эффекта «защелкивания».

7. Заключение

На основе анализа доминирующих радиационных эффектов в КМОП СБИС получила развитие методология радиационно-стойкого проектирования СБИС по нанометровым коммерческим технологиям объемного кремния.

Решена проблема обеспечения высокой дозовой стойкости, повышенной сбоеустойчивости при воздействии ТЧ и отсутствия эффекта «защелкивания» в СБИС СнК и ОЗУ изготавливаемых по коммерческим КМОП технологиям **объемного кремния** уровня 250—90 нм.

Создана среда проектирования таких СБИС, использование которой при создании радиационно-стойких СБИС СнК и ОЗУ в АО НПЦ «ЭЛВИС» и ряде Центров проектирования по КМОП технологиям объемного кремния позволило создать конкурентоспособные СБИС и обеспечить заявленные параметры РС «Категории-2».

Подробная информация о разработанных РС КМОП СБИС, библиотеках элементов и СФ-блоках на сайте www.multicore.ru.

Список литературы

1. Lacoë R. C. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodology. In Short Course Notebook. Nuclear and Space Radiation Effects Conf. — NSREC'03 (Monte-rey, Jul. 2003). 2003. С. II-1—II-142.
2. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. От первых КМОП транзисторов до радиационно-стойких нанометровых КМОП СБИС СнК // Сб. трудов 4-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». М : ТЕХНОСФЕРА, 2018. С. 228—234.
3. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. 216 с.
4. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Требования радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантия наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? // Сб. трудов 3-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и электронные модули». М. : ТЕХНОСФЕРА, 2017. С. 32—36.
5. Герасимов Ю. М., Глушков А. В., Григорьев Н. Г., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. Особенности проектирования радиационно-стойких библиотек элементов, СФ-блоков и нано-СБИС СнК // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2008. Сб. трудов / Под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М. : ИППМ РАН, 2008. С.272—275.
6. Wong H., Iwai H. On the scaling issues and high-k replacement of ultrathin gate dielectrics for nanoscale MOS transistors // Microelectronic Engineering. 2006. №. 83. С. 1867—1904.
7. Радиационная стойкость изделий ЭКБ / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. И. Чумакова. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
8. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М. : Радио и связь. 2004. 320 с.

9. Baumann R. Single-Event Effects in Advanced CMOS. In Short Course Notebook. Nuclear and Space Radiation Effects Conf. — NSREC'05 (Ceattle, Jul. 2005). С. II-1—II-59.
10. Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H. Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits // Proc. IEEE. 2003. Т. 91. № 2. С. 305—327.
11. Esqueda I. S., Barnaby H. J., Alles M. L. Two-dimensional methodology for modeling radiation-induced off-state leakage in CMOS Technologies // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. Т. 52. № 6. С. 2259—2264.
12. Barnaby H. J., McLain M. L., Esqueda I. S., Chen X. J. Modeling ionizing radiation effects in solid state materials and CMOS Devices // IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers. 2009. Т. 56. № 8. С. 1870—1883.
13. Witzak S. C., Lacoer R. C., Osborn J. V., Hutson J. M., Moss S. C. Dose-Rate Sensitivity of Modern nMOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. Т. 52. № 6. С. 2602—2608.
14. Gadlage M. J., Schrimpf R. D., Benedetto J. M., Eaton P. H., Mavis D. J., Sibley M., Avery K., Turflinger T. L. Single event transient pulsewidths in digital microcircuits // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. Т. 51. № 6. С. 3285—3290.
15. Giot D., Roche P., Gasiot G., Harboe-Sorensen R. Multiple-Bit Upset Analysis in 90 nm SRAMs : Heavy Ions Testing and 3D Simulations // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. Т. 54. № 4. С. 3278—3284.
16. Dodd P. E., Shaneyfelt M. R., Felix J. A., Schwank J. R. Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. Т. 51. № 6. С. 904—911.
17. Balasubramanian A., Bhuva B. L., Black J. D., Massengill L. W. RHBD Techniques for Mitigating Effects of Single-Event Hits Using Guard-Gates // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. Т. 52. № 6. С. 2531—2535.
18. Герасимов Ю. М., Глушков А. В., Григорьев Н. Г., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. Пат. 2539869 (РФ). Радиационно-стойкая библиотека элементов на комплементарных метал-окисел-полупроводник транзисторах. Оpubл. в Б. И., 2015. № 3.
19. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я. Пат. 2674415 (РФ). Радиационно-стойкая библиотека элементов на комплементарных метал-окисел-полупроводник транзисторах. Оpubл. в Б. И., 2018. № 34.
20. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Пат. 2674935 (РФ). Радиационно-стойкий элемент памяти для статических оперативных запоминающих устройств на комплементарных металл-окисел-полупроводник транзисторах. Оpubл. в Б. И. 2018. № 35.
21. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я. Радиационно-стойкие элементы памяти для нанометровых КМОП СФ-блоков и СБИС // Электронная техника, Серия 3, Микроэлектроника, 2015, № 1(157). С. 10—16.
22. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В. Методика выбора параметров логической цепи в нанометровых КМОП СБИС с повышенной сбоеустойчивостью // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2016. Сборник трудов / Под общ. ред. академика А. Л. Стемпковского. — М. : ИППМ РАН, 2016. Часть IV. С. 172—177.

Информация об авторах

Герасимов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории АО НПП «ЭЛВИС», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6026-4820.

Григорьев Николай Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3346-558X.

Кобыляцкий Андрей Вадимович, аспирант НИЯУ «МИФИ», младший научный сотрудник, АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3567-6276.

Петричкович Ярослав Ярославович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6502-6370.

Солохина Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1308-4720.

Information about the authors

Yuriy M. Gerasimov, Ph.D. in Engineering, senior researcher, laboratory chief at ELVEES R&D Center, JSC, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-6026-4820.

Nikolay G. Grigoryev, Ph.D. in Engineering, leading researcher, ELVEES R&D Center, JSC, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-3346-558X.

Andrey V. Koblyatskiy, post-graduate student of MEPHI National Research Nuclear University, junior researcher, ELVEES R&D Center, JSC, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-3567-6276.

Yaroslav Y. Petrichkovich, Dr. habil. in Engineering, professor, General Director of ELVEES R&D Center, JSC, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-6502-6370.

Tatiana V. Solokhina, Ph.D. in Engineering, deputy General Director of ELVEES R&D Center, JSC, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-1308-4720.