УДК 621.382.2/.3, ББК 32.853 DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.268.274

ОТ ПЕРВЫХ КМОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДО РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ НАНОМЕТРОВЫХ КМОП СБИС СнК

FROM THE FIRST CMOS TRANSISTORS TO THE RADIATION-HARDENED NANOMETER CMOS SYSTEMS-ON-CHIP

ГЕРАСИМОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ[1,2]
YGerasimov@elvees.com

ГРИГОРЬЕВ НИКОЛАЙ ГЕННАДЬЕВИЧ[1,2]

КОБЫЛЯЦКИЙ АНДРЕЙ ВАДИМОВИЧ[1,2]

ПЕТРИЧКОВИЧ ЯРОСЛАВ ЯРОСЛАВОВИЧ[1]

СОЛОХИНА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА[1]

[1] АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

GERASIMOV YURIY M.[1,2]
YGerasimov@elvees.com

GRIGORYEV NIKOLAY G.[1,2]

KOBYLYATSKIY ANDREY V.[1,2]

PETRICHKOVICH YAROSLAV YA.[1]

SOLOKHINA TATIANA V.[1]

[1] R&D Center "ELVEES", JSC
bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

[2] National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

Рассмотрены вопросы создания отечественных радиационно-стойких КМОП ИС и СБИС с момента появления первых микронных КМОП-транзисторов в 1968 г. до современных нанометровых СБИС типа «систем на кристалле» (СнК), изготавливаемых по технологиям объемного кремния уровня 250–90 нм. Проанализированы особенности радиационно-стойкого проектирования таких СБИС. На основе разработанных библиотек элементов и СФ-блоков создан ряд конкурентоспособных СБИС СнК и ОЗУ.
Ключевые слова: КМОП-транзисторы; СБИС СнК; радиационная стойкость; радиационно-стойкое проектирование; СФ-блоки.
The paper highlights the main questions of radiation-hardened CMOS IC design — from the first CMOS transistors in 1968 to modern nanometer "systems-on-chip" (SoC). The modern radiation-hardened CMOS IC are designed on bulk CMOS technologies ranging from 250 nm to 90 nm. The features of the VLSI radiation-hardness-by-design have been analyzed. A number of competitive systems-on-chip and SRAM chips have been designed based on radiation-hardened standard cell and IO libraries and IP-blocks.
Keywords: CMOS transistors; system-on-chip; radiation tolerance; radiation-hardness-by-design; IP-blocks.

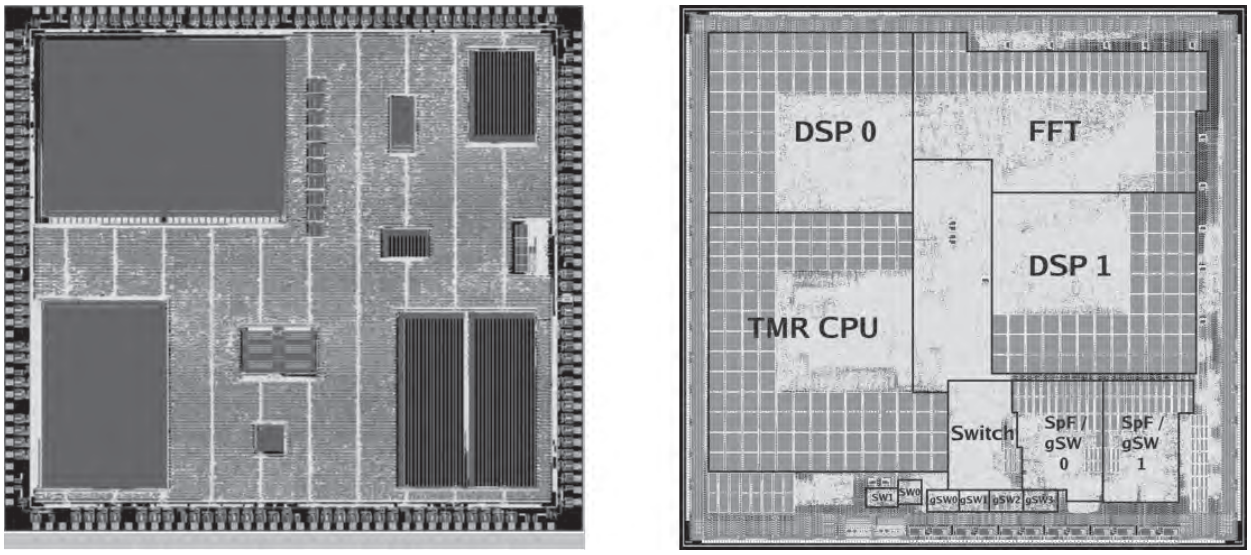
ВВЕДЕНИЕ

Создание перспективной высокопроизводительной радиационно-стойкой ЭКБ в России связано с развитием и освоением передовых КМОП-технологий. Впервые КМОП-технология в СССР появилась в 1968 году в НИИМЭ, когда были изготовлены первые КМОП транзисторные пары. В 1972–1982 гг. разработаны и переданы в серийное производство КМОП ИС серий 164/172 (564), в частности ИС 164(564)ЛП1 и К176РМ1(564РУ2) (poly-Si — затвор 6–3 мкм), сыгравшие важную роль в исследовании вопросов радиационной стойкости (РС).

В 1974 г. на два года позднее фирмы Intel в НПО «ЭЛАС» (НИИМП) был разработан первый в СССР КМОП микропроцессорный комплект БИС (на базе БМК с Мо-затвором). Важным этапом в создании РС КМОП БИС явилось открытие в 1976 г. в МИФИ отраслевой лаборатории «Методы расчета и проектирования КМОП БИС» (базовое предприятие НИИМП, научный руководитель — д. т. н., проф. Кармазинский А. Н.). Позднее был разработан первый радиационно-стойкий КНС комплект из десяти БИС (НИИМП, НИИ «Сапфир», МИФИ). В период с 1981 по 1985 гг. в НИИТТ при участии отраслевой лаборатории МИФИ были созданы первые радиационно-стойкие БИС ОЗУ серии 1617 емкостью 1 Кбит—64 Кбит.

К 2000 г. КМОП-технологии в России вышли на субмикронный уровень проектной нормы 0,8–0,6 (0,52) мкм. В этот период в ГУП НПЦ «ЭЛВИС» по КМОП-технологии объемного кремния ОАО «Ангстрем» уровня 0,56 мкм была разработана первая отечественная РС СБИС СнК — двухъядерный однокристальный сигнальный микроконтроллер «МУЛЬТИКОР-11» (рис. 1*а*), ставший основой всех дальнейших разработок СБИС данного семейства по глубоко-субмикронным и нанометровым КМОП-технологиям (рис. 1*б*).

Современные нанометровые КМОП СБИС СнК содержат сотни миллионов — миллиарды транзисторов на кристалле, как минимум одно процессорное ядро и большой объем различных блоков памяти и строятся на основе аттестованных СФ-блоков (IP-block), передаваемых разработчикам на языке высокого уровня (Soft),



а *б*

Рис. 1. Радиационно-стойкие КМОП СБИС СнК: а) сигнальный микроконтроллер «Мультикор-11», $\chi = 0{,}56$ мкм, $S_{кр} = 10{,}0\times 10{,}0$ мм^2, $N_{тр} \approx 2$ млн, б) сигнальный микропроцессор 1892ВМ15АФ, $\chi = 0{,}18$ мкм, $S_{кр} = 17{,}5\times 17{,}5$ мм^2, $N_{тр} \approx 60$ млн

в виде логической схемы (Firm) или топологической конструкции (Hard). В 2004 г. при ФГУП «НИИМА «Прогресс» была создана **Российская ассоциация центров проектирования в электронике**, где в рамках НИР «Интерфейс» разработана нормативная документация по проектированию СФ-блоков и СБИС СнК [1].

В настоящее время для разработчиков СБИС СнК стали доступны зарубежные глубоко-субмикронные КМОП-технологии уровня 0,35–0,13 мкм и нанометровые технологии уровня 90–16 нм. Появились российские фабрики, владеющие технологиями уровня 250–90 нм, в ближайшие годы возможно появление нанометровых (суб-100 нм) КМОП-технологий уровня 65 нм и менее.

По имеющимся в настоящее время данным представляется возможным создавать радиационно-стойкие СБИС СнК, удовлетворяющие высоким требованиям категории 2 [2], по коммерческим нанометровым КМОП-технологиям **объемного кремния** (ОК) с использованием методов радиационно-стойкого проектирования (РСП) — в зарубежной терминологии Radiation-Hardening-by-Design (RHBD) — без вмешательства в технологический процесс.

В данной работе на основе имеющихся компетенций о природе и о моделях физических эффектов в элементах КМОП СБИС [3–13] рассматриваются вопросы создания среды проектирования (в частности цифровых библиотек элементов и СФ-блоков) радиационно-стойких СБИС СнК по нанометровым КМОП-технологиям объемного кремния с использованием методов РСП и коммерческих средств САПР.

МАСШТАБИРОВАНИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КМОП ИС И СБИС

При уменьшении размеров элементов в СБИС масштабируются также и параметры, влияющие на их РС. В табл. 1 показана степень влияния (доминирования) различных радиационных эффектов на функционирование и параметры ИС и СБИС для КМОП-технологий различных уровней.

Особенности проявления радиационных эффектов в микронных и субмикронных микросхемах

В микронных и субмикронных ИС ($t_{ок} > 10$ нм, $L_k > 0{,}5$ мкм) доминируют первые три эффекта, приведенные в табл. 1, в глубоко-субмикронных и в нанометровых ($t_{ок} < 10$ нм, $L_k < 0{,}5$ мкм) СБИС — последние два.

«Защелкивание» (переключение в проводящее состояние) паразитных p-n-p-n тиристорных структур при воздействии тяжелых заряженных частиц, высокоэнергетичных нейтронов и протонов присуще КМОП-технологии объемного кремния и может приводить к катастрофическим отказам [3, 4]. При масштабировании размеров элементов и по мере совершенствования технологии стойкость к данному эффекту повышается, однако технологически полностью устранить этот эффект в рамках коммерческих технологий ОК не представляется возможным. Здесь наиболее эффективны конструктивно-топологические методы РСП.

Накопление положительного объемного заряда (ОЗ) в подзатворном окисле МОП-транзистора (МОПТ) приводит к изменению его порогового напряжения $U_{пор}$: для p-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 высококачественных окислах заряд сохраняется, как правило, длительное время и ожигается только при повышенной температуре.

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

На рис. 2 приведены типичные зависимости изменения порогового напряжения микронных и субмикронных p- и n-канальных МОПТ от дозы облучения, где сплошные линии показывают изменение $U_{пор}$ от ОЗ, пунктирные — от заряда ПС. В результате в БИС возможны следующие нарушения работоспособности:

- «защелкивание» паразитных p-n-p-n-структур, приводящее к катастрофическим отказам;
- нарушение функционирования, в частности, при $U_{порр} > U_{ип} - U_{пом}$,
- существенное возрастание тока потребления, при образовании встроенного канала у n-МОПТ ($U_{порп} < 0$);

Таблица 1. Доминирующие радиационные эффекты в КМОП ИС и СБИС

№ п/п	Доминирующие радиационные эффекты	Микронные ИС 10 мкм — 1 мкм	Субмикронные БИС 0,8 мкм — 0,35 мкм	Глубоко-субмикронные СБИС 0,35 мкм — 0,13 мкм	Нанометровые СБИС СнК ≤ 0,1 мкм
1	«Защелкивание» паразитных p-n-p-n-структур	Сильное влияние ++	Существенное влияние +	Умеренное влияние +/–	Слабое влияние –/+
2	Накопление положительного заряда в подзатворном окисле	Существенное влияние ++	Умеренное влияние +	Несущественное влияние +/–	Нет влияния –
3	Образование ПС на границе $Si\text{-}SiO_2$ подзатворного окисла	Существенное влияние ++	Умеренное влияние +	Несущественное влияние +/–	Нет влияния –
4	Накопление положительного заряда в изолирующем окисле (LOCOS/STI)	Нет влияния –	Несущественное влияние –/+	Умеренное влияние +	Существенное влияние ++
5	Ионизационные сбои при воздействии ТЧ	Нет влияния –	Умеренное влияние +	Существенное влияние +	Сильное влияние ++

- изменение логических уровней и токов выходных каскадов,
- снижение быстродействия до уровня ниже допустимого.

В микронных и субмикронных КМОП-технологиях проблемы повышения РС решались исключительно конструктивно-технологическими методами, в частности путем улучшения качества и структуры подзатворного окисла и при использовании p+ и n+ охранных колец, в чем был достигнут существенный прогресс. Схемотехнические методы повышения РС были ограниченны и менее эффективны. Они сводились в основном к оптимизации размеров МОП-транзисторов в элементах с учетом изменения их порогового напряжения и удельной крутизны при облучении [5].

В микронных и субмикронных БИС при воздействии ТЧ возможны единичные легко корректируемые сбои.

Радиационные эффекты в глубоко-субмикронных и нанометровых БИС и СБИС СнК

При масштабировании размеров субмикронных СБИС с толщиной подзатворного окисла $t_{ок} \leq 8$–10 нм относительное изменение порогового напряжения приборных транзисторов $\Delta U_{пор}/U_{ип} \sim \lambda$, где $\lambda < 1$ — коэффициент масштабирования. Для глубоко субмикронных и нанометровых МОП-транзисторов ($t_{ок} \leq 6$–7 нм) можно считать, что $\Delta U_{пор} = 0$ [8]. Для этих технологий преобладающими являются параметрические отказы, связанные исключительно с существенным возрастанием тока потребления СБИС и определяемого суммарными как собственными утечками, не зависящими от дозы облучения, так и «внутритранзисторными» и «межприборными» утечками паразитных МОП-структур при накоплении положительного заряда в изолирующих диэлектриках LOCOS/STI при облучении. В первом приближении можно считать, что отношение тока утечки к рабочему току приборного МОП-транзистора I_0 увеличивается при уменьшении проектных норм $I_{ут}/I_0 \sim (1/\lambda - 1/\lambda^2)$. Однако, по крайней мере до норм 65–40 нм, $I_{ут}/I_0 \leq 0{,}01$. Поэтому функциональные отказы в таких СБИС являются, как правило, следствием низкого качества проектирования. Например, при рабочем токе элемента $I_0 = 100$ мкА и токе утечки в элементе менее 100 нА в СБИС со степенью интеграции 100 млн элементов суммарный ток утечки составит 10 А, а при числе элементов 1 млн — всего 100 мА. **Поэтому сравнивать дозовую стойкость различных СБИС корректно только при одном уровне технологии и степени интеграции, а также мощности дозы и по одинаковым критериям.**

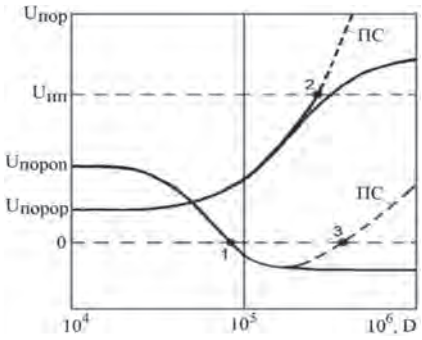


Рис. 2. Зависимость изменения $U_{пор}$ n-МОП- и p-МОП транзисторов при облучении: 1 — $U_{порп} < 0$, 2 — $U_{порр} > U_{ип}$, 3 — $U_{порп} > 0$

Катастрофические отказы в виде эффекта «защелкивания» и ионизационные сбои (одиночные события) наблюдаются в СБИС при воздействии тяжелых заряженных частиц, высокоэнергетичных нейтронов и протонов (ТЧ) [3, 4, 14]. Частотно-зависимые сбои в логических цепях (SET) и частотно-независимые сбои в элементах памяти и триггерах (SEU) при воздействии ТЧ резко усиливаются с уменьшением проектных норм, начинают проявляться множественные сбои [15]. Нанометровые КМОП СБИС особенно чувствительны к воздействию ТЧ. Это существенный, тяжело устранимый на этапе проектирования недостаток нано-СБИС. В первом приближении можно считать, что пороговое значение линейных потерь энергии $LET_0\ (E_0) \sim Q_i/L_{eff} \sim \lambda$, чувствительный заряд в узлах элементов $Q_i \approx U_{ип} \cdot C_i \sim \lambda^2$, удельное сечение насыщения $\sigma_{нас}$/бит $\sim \lambda^2$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

Накапливаемый в окисле приборных микронных и субмикронных МОП-транзисторов заряд и связанные с ним изменения порогового напряжения существенно зависят от их электрического режима и особенностей его изменения при облучении [5–8]. На рис. 3 приведены типовые режимы работы (включения) n-МОП-транзистора в схемах, где присутствуют напряжения на всех его выводах. На рис. 4 показаны зависимости напряжения затвор-канал $U_{зк}$ вдоль канала транзистора в этих режимах для случая отсутствия смыкания p-n-переходов стока и истока (режимы 3а, 6а — длинный канал) и при их смыкании (режимы 3б, 6б — короткий канал). Неодинаковая величина

напряжения затвор – канал $U_{зк}$ вдоль канала приводит к тому, что изменение порогового напряжения вдоль канала при облучении также не одинаково. В результате искажается форма ВАХ МОП-транзистора, а при перемене местами стока и истока ВАХ транзистора отличаются.

На рис. 5 приведены зависимости изменения эффективного порогового напряжения n- и p-МОП-транзисторов микросхемы 164ЛП1 (6 мкм) от дозы облучения в различных электрических режимах. В n-МОПТ в закрытом состоянии (режимы 2, 3) напряжение на стоке и/или истоке слабо влияет на изменение его $U_{пор}$, в то время как в открытом состоянии (режимы 5, 6) это влияние существенно. Наихудшим здесь является режим 4. В p-МОПТ, наоборот, наиболее существенно влияние напряжения на стоке и/или истоке в режиме 3 когда их p-n-переходы, проникая вглубь канала, понижают потенциал канала, что эквивалентно напряжению затвор – канал $U_{зк} > 0$. По характеру зависимости $\Delta U_{пор}$ в данных режимах можно заключить, что его возрастание при $D > 300$ крад связано с образованием ПС на границе раздела $Si\text{-}SiO_2$ и не зависит от электрического режима.

На рис. 6 приведены нормированные на максимальный ток при $U_{си} = 10$ В ВАХ p-МОП-транзисторов, облученных до дозы D_0 в различных режимах (рис. 3). Наибольшие искажения ВАХ наблюдаются в режимах 2 и 3, когда на подзатворном окисле в области канала вблизи стока и/или истока создается положительное поле.

При изменении электрического режима МОПТ во время облучения происходит перераспределение заряда между различными областями подзатворного окисла, что влияет на характер изменения его порогового напряжения. Впервые был экспериментально обнаружен и теоретически обоснован эффект накопления «неравновесного» заряда в подзатворном окисле МОП-транзистора при переключении режима его работы во время облучения [5, 7], связанный с изменением пространственного расположения накопленного в окисле заряда. Данный эффект может наблюдаться и наиболее существенно проявляться в p-канальных МОПТ в виде «всплеска» в изменении порогового напряжения при облучении. На рис. 7 показан характер изменения $U_{пор}$ p-МОПТ, предварительно облученных в режиме 4 при различных напряжениях затвор – подложка до дозы D0, после переключения этого напряжения в режим 1.

ТОКИ УТЕЧКИ В НАНО-СБИС ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Все многообразие токов утечки в КМОП СБИС можно разделить на собственные токи, не связанные с облучением, и токи утечки паразитных структур, возникающие при облучении. Собственные токи утечки достаточно подробно проанализированы в [9]. Как правило, при разработке техпроцессов эти токи минимизируются таким образом, чтобы в СБИС с предельной степенью

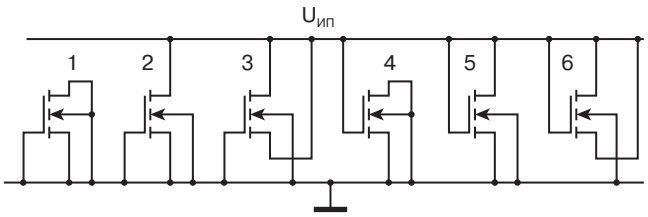
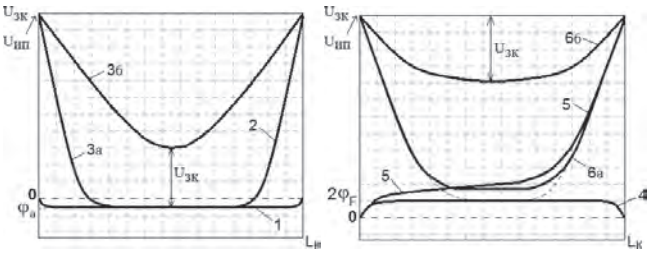


Рис. 3. Типовые электрические режимы работы МОП-транзистора в микросхемах

интеграции для данной технологии суммарный статический ток утечки (ток потребления) не превышал допустимую величину, составляющую, как правило, несколько десятков-сотен миллиампер.

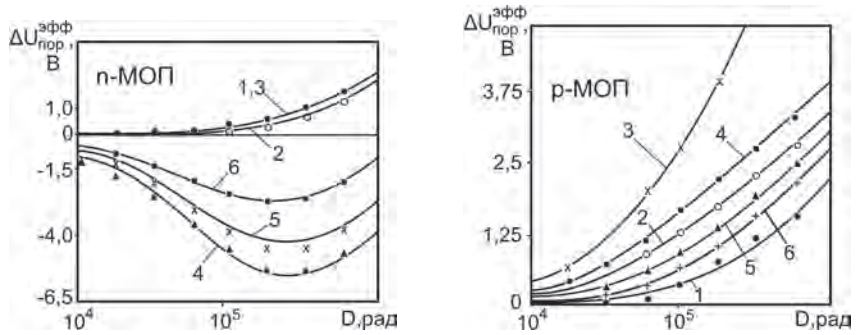
Токи утечки, возникающие при облучении, связаны с накоплением положительного заряда в изолирующих LOCOS/STI-структурах вдоль их границ раздела с подложкой p-типа, где образуются паразитные n-МОП-транзисторы. Все возможные структуры этого типа наглядно иллюстрируются на рис. 8 на примере топологии (нижние слои) цепочки чередующихся последовательно соединенных логических элементов И-НЕ/ИЛИ-НЕ, где «0», «1» — логические состояния элементов при облучении/измерении.

В нано-СБИС токи утечки при облучении также зависят от электрического режима паразитных n-МОПТ. Для «внутритранзисторных» структур (1 на рис. 5) возможны все электрические режимы на рис. 3. Однако, в отличие от приборных МОПТ, в режимах 4–6 эти транзисторы, в связи с тем что их пороговое напряжение до облучения больше напряжения питания $U_{ип}$, находятся в закрытом состоянии. Тем не менее зависимость тока утечки от напряжения на затворе наблюдается, о чем свидетельствуют, в частности, результаты исследования [10], приведенные на рис. 9. Здесь наихудшим также является режим 4.



а *б*

Рис. 4. Зависимость напряжения затвор – канал ($U_{зк}$) в различных режимах: а) режимы 1–3 ($U_{зп} = 0$); б) режимы 4–6 ($U_{зп} = U_{ип}$)



а *б*

Рис. 5. Изменение $U_{пор}$ МОПТ в различных электрических режимах: а) n-МОП; б) p-МОП

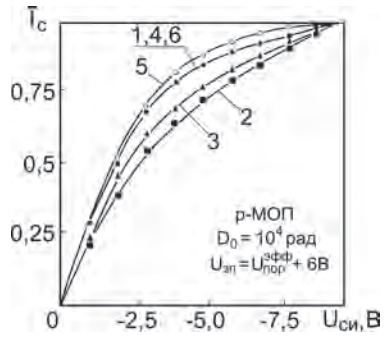
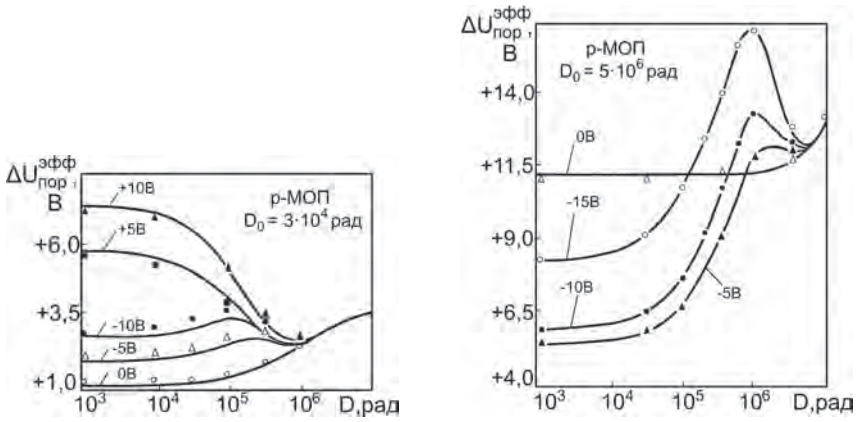
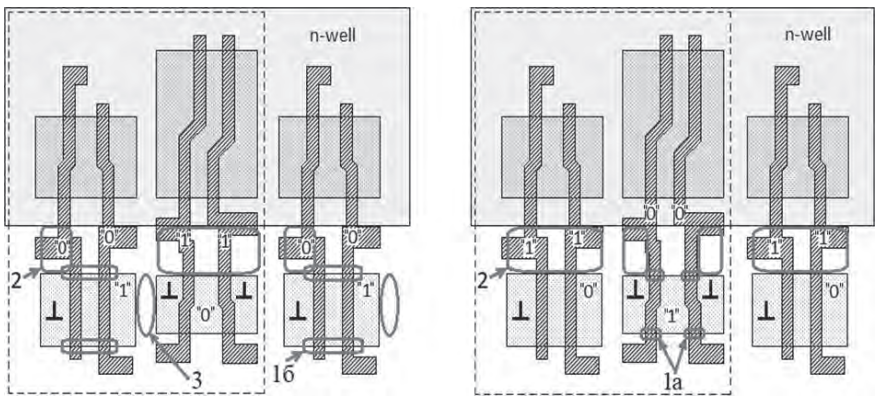


Рис. 6. Нормированные ВАХ p-МОПТ, облученных в различных режимах 1–6



а *б*

Рис. 7. Изменение порогового напряжения p-МОПТ при переключении режима его работы при облучении: а) ИС 565ПУ4, б) ИС 164ЛП1



а *б*

Рис. 8. 1 — «Внутритранзисторные» утечки: 1а — отдельный МОПТ, 1б — последовательные МОПТ; 2 — «межприборные» утечки n-well - n+, 3 — «межприборные» утечки n+-n+

Для «межприборных» паразитных структур n+-n+ все режимы 1–6 реализуются только при наличии над STI-областями поликремниевой разводки (затвора), в противном случае режимы 4–6 невозможны. Для структур n+-n-карман в связи с тем, что карман всегда находится под напряжением питания $U_{ип}$, режимы 1 и 4 в реальных условиях работы невозможны, а при отсутствии над STI-областями поликремниевой разводки невозможны также режимы 5 и 6. Учет «межприборных» утечек наиболее сложен, поскольку в реальной топологии часть этих структур покрыта поликремнием, а часть не покрыта. В зависимости от состояния

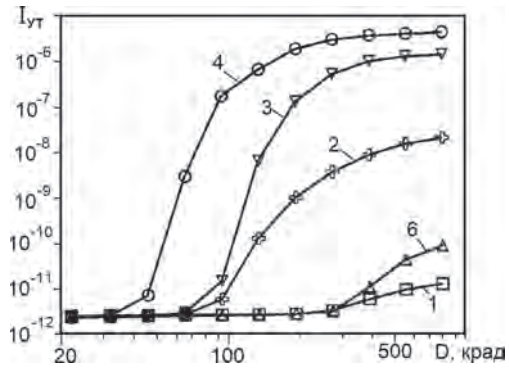


Рис. 9. Зависимость «внутритранзисторной» утечки n-МОПТ от дозы облучения в режимах 1–4 и 6 для технологии уровня 180 нм [10]

элемента при облучении и измерении величины этих утечек могут существенно отличаться.

В нано-СБИС токи утечки паразитных структур 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 облучения [10]. Это подтверждается также результатами проведенных нами экспериментальных исследований ряда тестовых кристаллов и СБИС. На рис. 10 в качестве примера показаны экспериментальные зависимости тока потребления (утечки) КМОП СБИС ОЗУ 1657РУ2У емкостью 16 Мбит (130 нм) при облучении в активном режиме мощностью дозы $P \approx 100$ рад/с (рис. 7*а*) и отжиге (рис. 7*б*) в пассивном режиме (питание выключено) после предварительного облучения до дозы $D_0 = 1{,}0$ Мрад.

При облучении все ЯП находились в состоянии лог. «0». Измерение тока потребления производилось в исходном состоянии лог. «0» и при инверсии 25% ЯП накопителя. На рис. 7*а* пунктирные кривые — прогноз при инверсии 50–100% ЯП накопителя. Перед отжигом (рис. 7*б*) предварительное облучение производилось при произвольной информации, записываемой в ЯП накопителя при включении питания. Измерение — при записи противоположной информации, хранимой при облучении, при записи во все ЯП лог. «0» и лог. «1».

В соответствии с моделью накопления и рассасывания заряда в подзатворных STI-окислах паразитных n-МОПТ, описанной в [10], зависимость тока утечки от времени облучения ($I_{обл}$) и отжига ($I_{отж}$) в первом приближении можно представить в следующем виде:

$$I_{обл} = N_t \cdot (1 - \tau_н/\tau_p) \cdot F[1 - exp(-t/\tau_н)]^n,$$

$$I_{отж} = I_{обл}(t_{обл}) \cdot F[exp(-(t - t_{обл})/\tau_p)]^n,$$

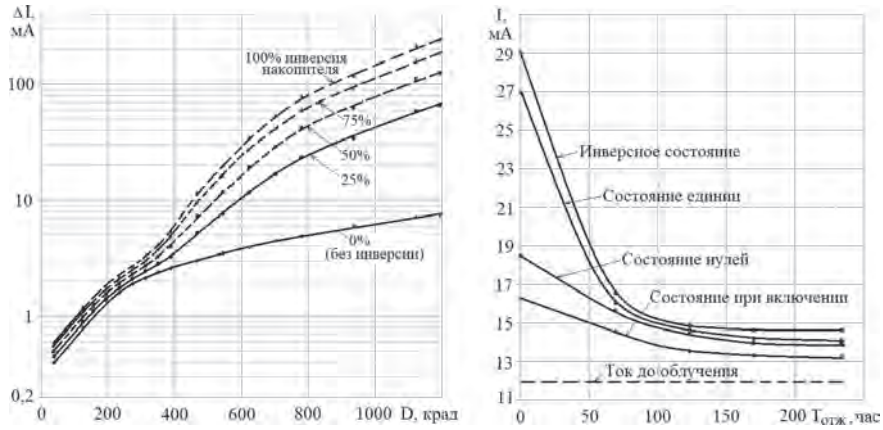
где $F(t)$ — квазиэкспоненциальная функция зависимости тока утечки от накопленного заряда в STI-окисле паразитного n-МОПТ, $n \approx 1$–2, $1/\tau_н = 1/\tau_p + k \cdot P$, P — мощность дозы, $\tau_н$, τ_p — постоянные времени накопления и рассасывания заряда, N_t — плотность дырочных ловушек, k — постоянный коэффициент для накопления заряда. При низкой мощности дозы $I_{обл} \sim k \cdot N_t \cdot P \cdot \tau_p$, $\tau_н \approx \tau_p$, при высокой мощности дозы $I_{обл} \sim N_t$, $\tau_н \approx 1/kP$.

На рис. 11 показан характер изменения тока «внутритранзисторной» утечки в n-МОПТ в соответствии с приведенными выше соотношениями, где 1–5 — ток утечки при облучении ($I_{обл}$) до дозы D_0 при различных мощностях дозы $P1 > P2 > P3 > P4 > P5$, 6 — изменение тока утечки при отжиге ($I_{отж}$).

КОНСТРУКТИВНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РС

По мере уменьшения проектных норм, усложнения и удорожания техпроцессов акцент в повышении РС сместился на этап разработки СБИС, получило развитие направление радиационно-стойкого проектирования (РСП) [16]. Применение тех или иных технических решений при РСП зависит от особенностей проявления различных физических эффектов в типовых конструктивно-топологических структурах СБИС при радиационном воздействии, условий работы, а также от требований к параметрам РС.

Для проектирования РС нано-СБИС СнК категории 2 по нанометровым КМОП-технологиям объемного кремния применяются следующие технические решения.



а *б*

Рис. 10. Зависимость тока потребления СБИС ОЗУ при облучении и отжиге: а) облучение при хранении лог. «0», измерение без инверсии и с инверсией 25% накопителя, инверсия 50% — 100% прогноз (пунктир); б) отжиг при выключенном питании

1. Для подавления эффекта «защелкивания» в каждом элементе используется «жесткая» p+-охрана между областями n-карманов и n+-областями стоков/истоков.

Использование такой охраны 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 элементов также применяется p+-охрана. Базовая конструкция элемента с такой p+-охраной приведена на рис. 12 [17]. Данная конструкция не устраняет «внутритранзисторные» утечки. Устранение данной утечки возможно при использовании конструкции с кольцевой конфигурацией затворов транзисторов [11]. Однако в глубоко-субмикронных КМОП-технологиях элементы с такой конфигурацией занимают недопустимо большую площадь на кристалле, а в нанометровых технологиях — не допускаются правилами проектирования.

2. Для уменьшения «внутритранзисторных» утечек используются слаботекущие HVT n-канальные МДПТ, а также, если это допускает технология, вводятся краевые уширения (dog bones) [12]. Опция SVT (быстродействующая) используется только в p-канальных МОПТ.

3. Для повышения сбоеустойчивости элементов проводится оптимизация размеров элементов и коэффициентов нагрузки в логических цепях, увеличение чувствительного заряда в узлах ячеек памяти, уменьшение размеров областей собирания заряда. Использование «жесткой» p+ и n+-охраны также повышает сбоеустойчивость элементов.

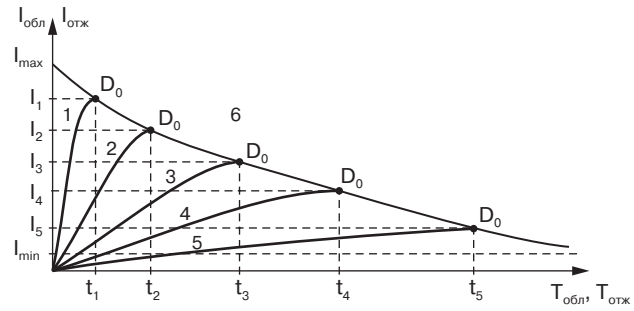


Рис. 11. Модель изменения тока утечки при накоплении-отжиге заряда в STI-окисле

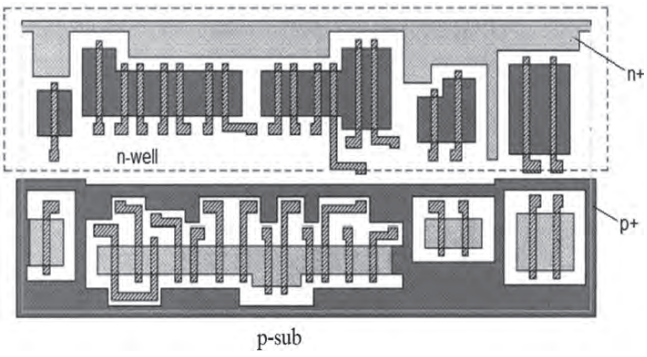


Рис. 12. Подавление эффекта «защелкивания» и «межприборных» утечек p+-охраной

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ БИБЛИОТЕКИ ЭЛЕМЕНТОВ И СФ-БЛОКИ

Для доступных средств САПР разработана среда проектирования радиационно-стойких СБИС СнК для базовых КМОП-технологий объемного кремния уровня 180 нм и 90 нм, включающая:

- совокупность данных и правил РСП и верификации топологии;
- аттестованные библиотеки цифровых элементов и СФ-блоков, в том числе и по РС;
- набор тестовых структур и кристаллов для прогнозирования параметров РС и аттестации СФ-блоков;
- методики оптимизации параметров быстродействия и оценки радиационной стойкости.

Состав радиационно-стойких библиотек элементов и Hard СФ-блоков (топологический конструктив):

- универсальные стандартные и специальные быстродействующие цифровые элементы;
- универсальные и специализированные (LVDS, SSTL) периферийные площадочные элементы;
- **СФ-блоки 1- и 2-портовой памяти и регистровых файлов и их компиляторы;**
- СФ-блок синтезатора системных частот на основе ФАПЧ, диапазон частот 4–600 МГц;
- СФ-блок обмена данными с памятью типа DDR2 SDRAM с приемопередатчиками SSTL_18;
- **СФ-блоки приемопередатчиков высокоскоростных мультипротокольных портов SpaceWire-RUS (SpaceFibre) со скоростью передачи данных 1,25 Гбит/с и 3,125 Гбит/с (в перспективе 6,25 Гбит/с).**

Важным этапом проектирования радиационно-стойких СБИС СнК и СФ-блоков, расчетно-экспериментальной оценки их стойкости являются разработка и исследование специальных тестовых структур и элементов. Разработан ряд тестовых кристаллов для КМОП базовых технологий ОК, содержащих, в частности:

- специальные паразитные тестовые структуры и транзисторы,
- различные схемотехнические и конструктивно-топологические решения ячеек памяти,
- блоки кольцевых генераторов для исследования динамических параметров библиотечных элементов,
- тестовые универсальные и специальные площадочные элементы,
- аттестуемые Hard СФ-блоки.

По результатам исследования элементов специальных тестовых кристаллов определены необходимые параметры стойкости и аттестованы библиотеки элементов и СФ-блоков. С использованием расчетно-экспериментальных методов проведена характеризация библиотечных элементов и СФ-блоков по критерию РС. Выбраны схемотехнические и конструктивно-топологические решения, обеспечивающие повышенный уровень дозовой стойкости и сбоеустойчивости, в которых катастрофические отказы в виде эффекта «защелкивания» в разработанных СБИС СнК не наблюдаются. Использование разработанной среды проектирования АО НПЦ «ЭЛВИС» и рядом центров проектирования при создании КМОП СБИС СнК по отечественной технологии объемного кремния уровня 180 нм позволило обеспечить заявленные параметры РС категории 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения комплекса работ по проектированию радиационно-стойких КМОП СБИС СнК АО НПЦ «ЭЛВИС» получены следующие результаты.

1. Показано, что при облучении модели накопления заряда в подзатворном окисле микронных и субмикронных МОП-транзисторов применимы и для анализа токов утечки паразитных n-МОП-структур с STI защитным окислом для глубоко субмикронных и нанометровых КМОП-технологий.
2. Решена проблема обеспечения высокой дозовой стойкости (до 1 Мрад) и отсутствия эффекта «защелкивания» в СБИС СнК в рамках стандартных КМОП-технологий объемного кремния уровня 250 нм — 90 нм.
3. Создана среда проектирования радиационно-стойких СБИС СнК для КМОП-технологий объемного кремния уровня 250 нм, 180 нм и 90 нм.
4. На основе собственных РС-библиотек элементов и СФ-блоков для КМОП-технологий объемного кремния уровня 250–130 нм создан ряд РС СБИС СнК и ОЗУ, удовлетворяющих высоким требованиям аппаратуры для аэрокосмических применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микросхемы интегральные. Системы на кристалле и сложно-функциональные блоки. Термины и определения // Стандарт предприятия СТП ИЛТА 06.00.00-09, ФГУП «НИИМА «Прогресс», 2009.
2. 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. докладов, 3-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — С. 32–36.
3. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 2004. — 320 с.
4. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание // под ред. д. т. н., проф. А. И. Чумакова. — М.: НИЯУ МИФИ, 2015. — 512 с.
5. Герасимов Ю. М. Исследование физических эффектов в МДП-транзисторах при стационарном облучении и методов схемотехнического проектирования радиационно-стойких микросхем / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Москва: МИФИ, 1982. — 292 с.
6. Герасимов Ю. М., Кармазинский А. Н. Модель накопления заряда в диэлектрике МДП-структуры // Радиотехника и электроника, АН СССР, 1986. — Т. XXXI, № 7. — С. 1382–1389.
7. Герасимов Ю. М., Кармазинский А. Н. Кинетика накопления заряда в диэлектрике МДП-структуры // Радиотехника и электроника, АН СССР, 1986. — Т. XXXI, № 7. — С. 1390–1397.
8. Lacoe R. C. *CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodology* // Short Course Notebook, Nuclear and Space Radiation Effects Conf. (NSREC'03), Monterey, CA, Jul. 2003. P. II-1–II-142.
9. Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H. *Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits* // Proc. of IEEE, 2003. Vol. 91. № 2. P. 305–327.
10. Witczak S. C., Lacoe R. C., Osborn J. V., Hutson J. M., Moss S. C. *Dose-Rate Sensitivity of Modern nMOSFETs* // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005. Vol. 52. № 6. P. 2602–2608.
11. 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. Vol. 56. № 8. P. 1870–1883.
12. Esqueda I. S., Barnaby H. J., Alles M. L. Two-dimensional methodology for modeling radiation-induced off-state leakage in CMOS Technologies, 2005. Vol. 52. № 6. P. 2259–2264.
13. Haddad N. F., Chan E., Doyle S., Kelly A. T., Lawrence R. K., Lawson D., Patel D., Ross J. *The path and challenges to 90-nm radiation-hardened technology* // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2009. Vol. 56. № 4. P. 2077–2082.
14. 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. Vol. 51. № 6. P. 904–911.
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. Vol. 54. № 4. P. 3278–3284.
16. 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 наноэлектронных систем — 2008. Сб. трудов / Под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2008. — С. 272–275.
17. Герасимов Ю. М., Глушков А. В., Григорьев Н. Г., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. Радиационно-стойкая библиотека элементов на комплементарных метал-окисел-полупроводник транзисторах / Патент на изобретение № 2539869 от 24.12.2013, ЗАО «ЭЛВИИС».