



ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СУБМИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ СНИЖЕНИИ ПРОЕКТНЫХ НОРМ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

EVOLUTION OF RADIATION EFFECTS IN SUB-MICROELECTRONIC DEVICES AND TEST FACILITIES

А.Ю.Никифоров^{1,2}, д.т.н., проф., М.С.Горбунов^{1,2}, доц., к.т.н., (ORCID: 0000-0002-4017-7033), А.А.Смолин^{1,2}, к.т.н., зам. руководителя, (ORCID: 0000-0002-9396-1753), Д.В.Бойченко^{1,2}, к.т.н., генеральный директор, Г.Г.Давыдов^{1,2}, к.т.н., зам. начальника НТК / aynik@spels.ru

A.Yu.Nikiforov^{1,2}, Doct. of Sci. (Technical), Prof., M.S.Gorbunov^{1,2}, Cand. of Sci. (Technical), docent, A.A.Smolin^{1,2}, Cand. of Sci. (Technical), Deputy director, D.V.Boychenko^{1,2}, Cand. of Sci. (Technical), CEO of JSC "SPELS", G.G.Davydov^{1,2}, Deputy Director

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.5.298.310

Получено: 30.08.2021 г.

В аналитическом обзоре рассмотрены особенности радиационного поведения современных субмикронных микроэлектронных приборов при снижении проектных норм, а также перспективы развития обеспечивающей инфраструктуры для радиационных испытаний.

We provide a brief evolution trends overview of the modern sub-microelectronic devices and its radiation behavior, focusing on new structures and materials. Evolution of test facilities is also considered.

ВВЕДЕНИЕ

Основные закономерности эволюции современных СБИС основаны на принципах масштабирования КМОП-транзисторов, сформулированных Р.Деннардом в 70-х годах [1] и вполне корректно описывающих развитие КМОП-технологий в течение почти тридцати лет. Однако переход к проектным нормам 65 нм и менее потребовал значительного расширения номенклатуры материалов, используемых в КМОП СБИС. На рис.1 показана разница в составе химических элементов, используемых в типичных КМОП-техпроцессах: в конце 1990-х годов и в настоящее время [2].

Не менее значимые изменения произошли и в геометрии транзисторных структур. Здесь

наиболее существенен переход от объемного кремниевого процесса к полностью обедненной структуре кремний-на-изоляторе (КНИ) (FD SOI) с ультратонкой рабочей областью, а также к FinFET, которые уже стали реальностью. Следующими шагами эволюции наноструктур, как ожидается, будут Gate-All-Around (GAA), Nanosheet, RibbonFET, но это перспектива [3].

Наряду с традиционным уменьшением размеров используются 3D-стеки транзисторов, подерживая актуальность закона Мура (рис.2 [4]). Новая электронная компонентная база (ЭКБ) становится все более "умной", то есть более функциональной, более компактной, становится частью комплексных сетевых систем. Эти новые качества обусловили сдвиг тренда: от отдельных

¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (НИЯУ МИФИ) / National Research Nuclear University "MEPhI".

² АО "ЭНПО СПЭЛС" / JSC "SPELS".

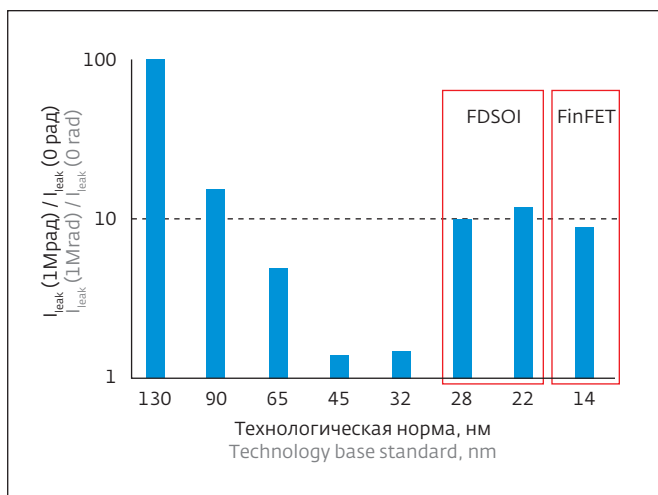


Рис.3. Зависимость тока утечки при дозовом воздействии от проектных норм (собственные данные и [9])

Fig.3. Leakage trends (own data and data from [9])

и других экстремальных условиях, так и в нормальных условиях эксплуатации.

ДОЗОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРАХ

В ходе эволюции субмикронных приборов происходило объективное снижение чувствительности планарных КМОП-структур к дозовым эффектам (Total Ionizing Dose, TID) при уменьшении проектных норм – в основном за счет роста уровня легирования области канала и карманов, а также вследствие использования более тонких диэлектриков. Таким образом, для технологий с проектными нормами менее 65 нм довольно типичной является минимальная

радиационная деградация характеристик даже при высоких уровнях накопленной дозы [9]. Эта тенденция отражена на рис.3, где показаны изменения тока утечки (нормированные на значение до облучения) после поглощенной дозы 1 Мрад (Si) для нескольких поколений КНИ-приборов. Следует отметить, что подобная зависимость наблюдается и для приборов на объемных КМОП-структурах.

Однако при переходе к FD SOI и FinFET с нелегированным каналом влияние дозовых эффектов вновь стало заметным (рис.3). На рис.4 показаны различные случаи зависимости тока потребления микропроцессоров, реализованных по технологии КМОП 28 нм. Как правило, при дозовых воздействиях токи или вовсе не деградируют (что может быть обусловлено особенностями техпроцесса, например очень низкими уровнями тока утечки) или деградируют с невысоким уровнем насыщения. Важно отметить соотношение реальных значений токов и заданных норм: из рис.4 видно, что токи могут варьироваться от десятков мА до десятка Ампер. Установленные нормы на токи могут быть еще выше (например, норма для ядра микропроцессора № 1 составляет 12 А), поэтому параметрический отказ отсутствует. В случае микропроцессора № 3 на рис. 4, наблюдается дозовая деградация тока при не очень высокой норме: здесь наблюдается параметрический отказ, хотя формально его не было бы, если бы норма была задана на уровне 2–3 А.

Радиационно-индуцированные сдвиги порогового напряжения V_{th} традиционно ассоциировались с захватом заряда в подзатворных

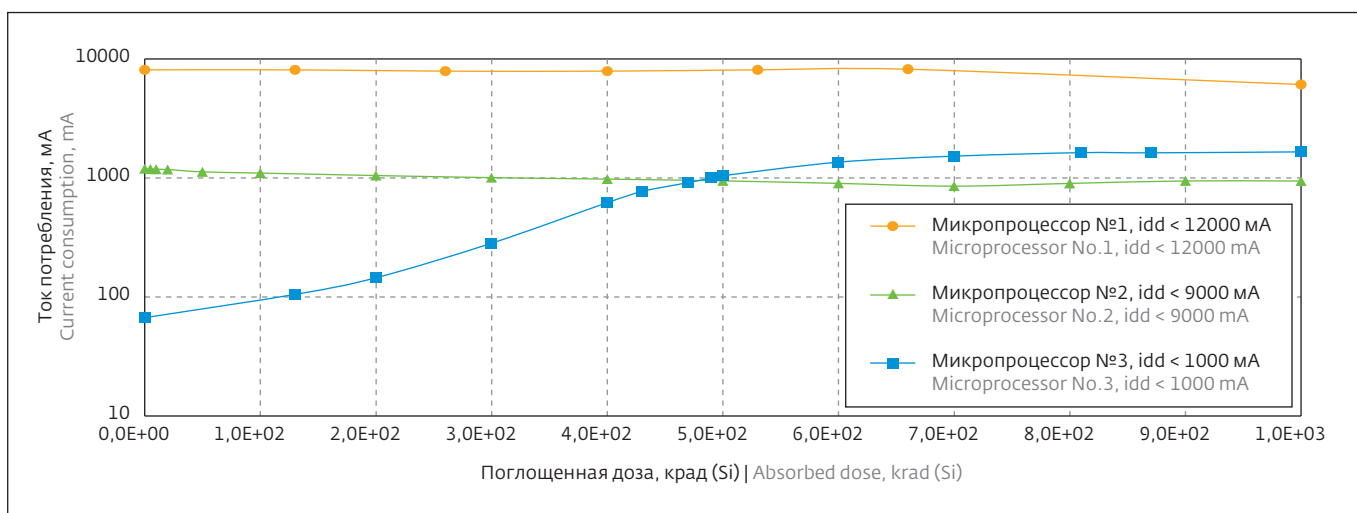


Рис.4. Дозовая зависимость тока потребления микропроцессоров на структурах КМОП 28 нм

Fig.4. CMOS 28 nm Microprocessors Supply current total dose dependences

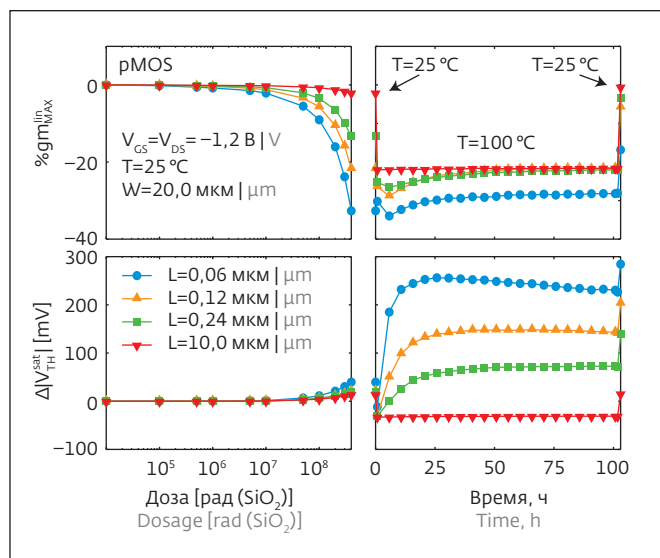


Рис.5. Изменение крутизны (верхний ряд) и сдвиг порогового напряжения (нижний ряд) для р-канальных транзисторов с различными длинами канала после облучения
 Fig.5. Percentage variation of the transconductance (top row) and threshold voltage shift (bottom row) for pMOS transistors with different channel lengths during and after irradiation

диэлектриках. В современных технологиях эти диэлектрики стали ультратонкими и, как следствие, МОП-транзисторы таких технологий стали практически нечувствительными к эффектам накопленной дозы [10]. Однако масштабирование МОП-транзисторов привело к появлению новых механизмов деградации, связанных с захватом заряда в изолирующих окислах и сопутствующим ростом токов утечки. Значимая электростатическая связь между зарядом, захваченным в боковой изоляции STI, и областью канала обусловила возможность значительных сдвигов V_{th} в узкоканальных приборах [11, 12]. Диэлектрики спейсеров также влияют на пороговое напряжение вследствие так называемого радиационно-индуцированного эффекта короткого канала (RISCE) [13], который становится существенным при ультравысоких дозах. RISCE развивается в две стадии, сначала определяя дозовую деградацию крутизны, а затем – сдвиг порогового напряжения (см. рис.5) [14].

Существенное дозовое воздействие на диэлектрики спейсеров вызывает образование поверхностных состояний вследствие высокой концентрации водорода [13]. Электростатическая связь оказывает влияние на дозовую деградацию FD SOI МОП-транзисторов вследствие накопления радиационно-индуцированного заряда между активной

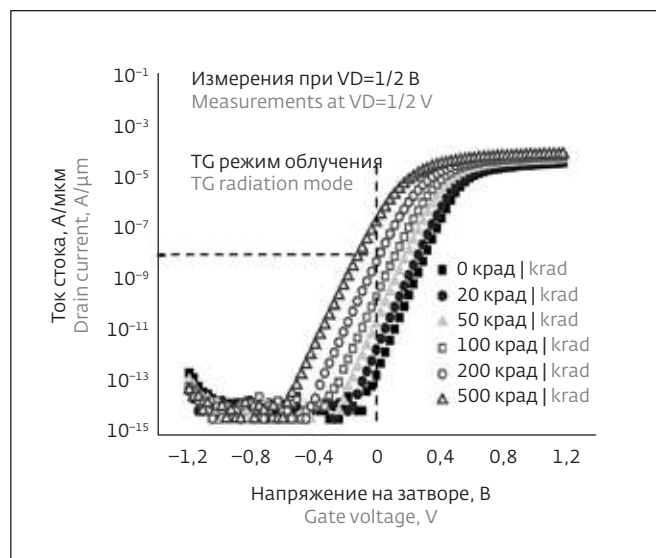


Рис.6. Типичные BAX FD SOI при различных накопленных дозах
 Fig.6. A typical FDSOI IV curve at different irradiation levels

областью и скрытым оксидом. В результате основным механизмом деградации МОП-транзисторов снова становится сдвиг порогового напряжения, как это было в старых процессах с толстыми подзатворными оксидами. Типичная вольтамперная характеристика МОПТ при разных значениях накопленной дозы показана на рис.6 [15].

Отметим, что та же электростатическая связь позволяет восстановить первоначальное значение порогового напряжения путем подачи отрицательного смещения к подложке n- и р-канального МОП-транзисторов [16]. Этот способ компенсации захваченного заряда ранее использовался в частично обедненной КНИ-технологии (PD SOI). Важным отличием FD SOI является более слабая зависимость деградации от электрического режима и от типа канала за счет более тонкого скрытого оксида (BOX). Это позволяет более эффективно использовать одно и то же смещение подложки для всего кристалла без значительного риска перекомпенсации.

В FinFET структурах чувствительность к дозовым эффектам обусловлена целым рядом особенностей: типом подложки (объемная или КНИ), близостью захваченного в STI заряда к активной области, эффективностью бокового управления затвором, легированием боковых областей, геометрией угла канавки и другими [17–19]. Стойкость FinFET может варьироваться в диапазоне от 100 крад (Si) до более 1 Мрад (Si). Для FinFET на объемном кремнии более сильная деградация наблюдается для меньших ширин "плавника" и меньших

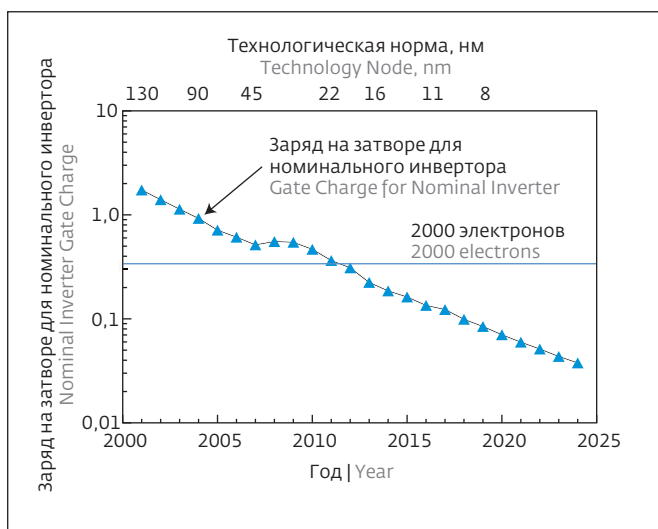


Рис.7. Масштабирование заряда элемента согласно ITRS для номинальных инверторных структур из 3-х NMOS и 6-ти PMOS

Fig.7. Gate charge ITRS scaling for a nominal 3x NMOS and 6x PMOS inverter structure

длин из-за сильной связи между STI и областью канала [17]. Противоположный тренд характерен для КНИ FinFET, где радиационно-индуцированная деградация уменьшается благодаря более эффективному боковому электростатическому контролю затвора [19, 20]. В некоторых случаях, FinFET демонстрируют положительные сдвиги порогового напряжения, обусловленные захватом электронов в HfO_2 [21]. Следует отметить, что в HfO_2 может происходить захват как электронов, так и дырок с относительной эффективностью, зависящей от структуры прибора, особенностей изготовления и электрического смещения [22-24].

В последние годы был достигнут значительный прогресс в характеризации радиационной стойкости приборов на основе новых материалов канала, отличающихся от кремния. SiGe p-MOП FinFET продемонстрировали высокую дозовую стойкость [25], а InGaAs FinFET – еще более высокую [26]. Некоторые ранние экспериментальные результаты были получены для графеновых транзисторов [27], инверторов на основе одностенных углеродных нанотрубок (SWCNT) [28] и для МОП-транзисторов на основе черного фосфора (BP) [29].

ОДИНОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРАХ

Основной особенностью проявления одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) при снижении проектных норм является уменьшение критического заряда, необходимого для переключения элемента, как показано на рис. 7.

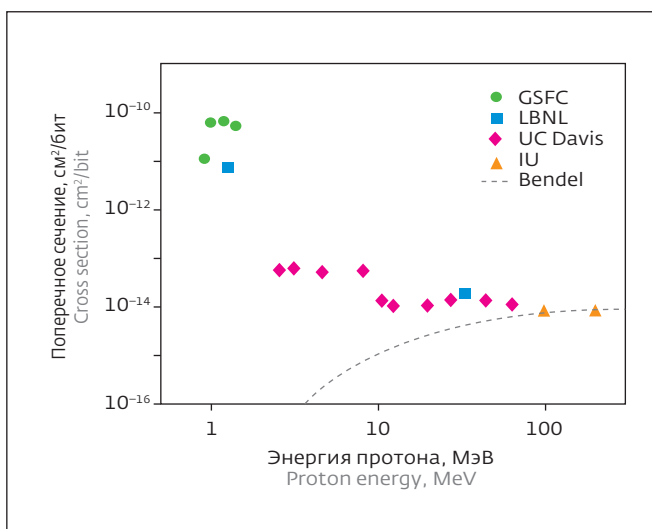


Рис.8. Сечение сбоев от протонов для 65 нм объемного КМОП СОЗУ

Fig.8. Proton single event upset cross-section curve for a 65 nm bulk CMOS SRAM

В современных технологиях величина критического заряда составляет всего несколько тысяч электронов. Для сравнения, альфа-частица с энергией 1,5 МэВ генерирует около 75 электронов на нанометр длины пробега в активной области кремния [30]. Уменьшение критического заряда ведет к расширению спектра частиц, которые могут вызывать одиночные эффекты. В частности, стали возможны сбои вследствие прямой ионизации от протонов (рис.8) и мюонов (рис.9). В настоящее время мюоны – являются скорее потенциальной, чем реальной опасностью для приборов, реализованных

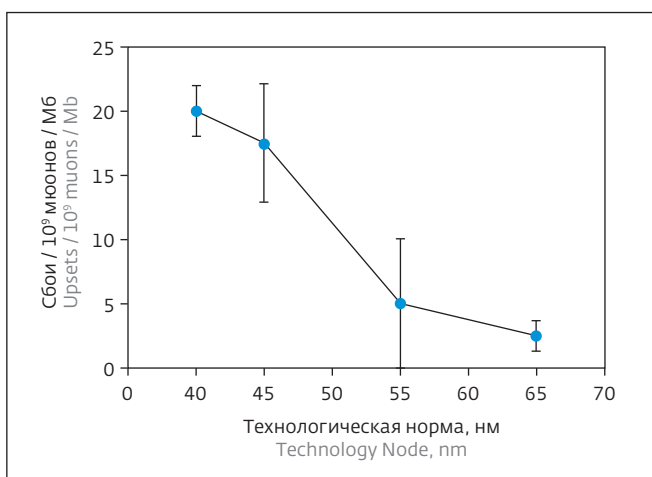


Рис.9. Сбои от мюонов в зависимости от технологических норм

Fig.9. Muon-caused upsets dependence on the technology nodes

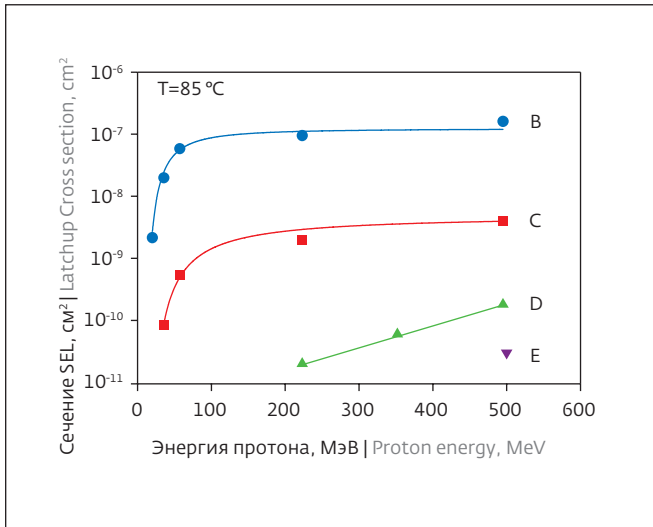


Рис.10. Сечение тиристорного эффекта в зависимости от энергии протона

Fig.10. Latchup cross section dependence on proton energy

на современных технологиях. Кроме того, исследования показывают, что эффекты, вызванные мюонами, проявляются не во всех техпроцессах даже с одними и теми же технологическими нормами, а зависят от особенностей конкретной технологии.

Использование тяжелых элементов в современных техпроцессах также оказывает влияние на проявление одиночных эффектов. Здесь возможны два механизма влияния. Первый – это ядерные реакции при взаимодействии высокоэнергетических протонов с атомами тяжелых элементов, что может сопровождаться формированием вторичных частиц с линейными потерями энергии (ЛПЭ) до 38 МэВ·см²/мг. В результате, одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) при воздействии протонов могут наблюдаться в приборах с пороговыми ЛПЭ выше типовых значений для кремния – 15 МэВ·см²/мг, то есть выше базового уровня, который традиционно считался показателем нечувствительности к воздействию протонов. На рис.10 показаны сечения тиристорного эффекта при воздействии протонов, в том числе в приборах D и E, для которых при облучении ионами пороговые ЛПЭ составили 25 и 20 МэВ·см²/мг соответственно.

Второй возможный эффект – это ядерные реакции при воздействии ионов, в результате которых в подпороговой области ЛПЭ наблюдаются сбои из-за формирования вторичных частиц. На практике этот механизм может быть идентифицирован по наличию энергетической зависимости сечения

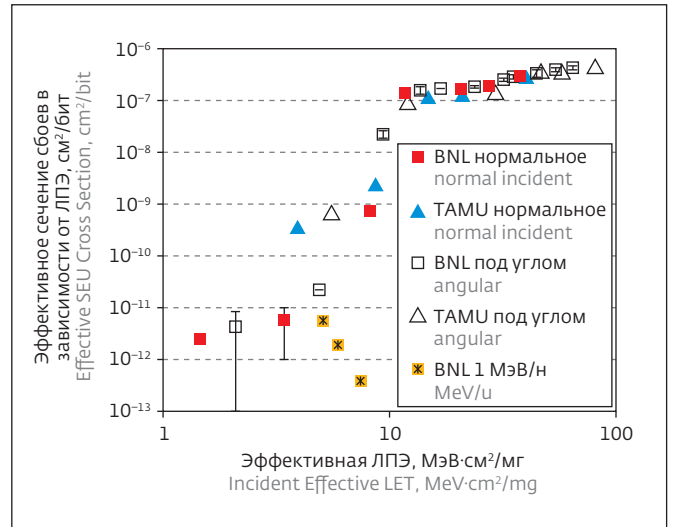


Рис.11. Эффективное сечение сбоев в зависимости от ЛПЭ

Fig.11. Effective SEU cross section dependence on LET

ОРЭ для ионов с одними и теми же ЛПЭ, как показано на рис.11.

В отношении тиристорного эффекта (в отличие от сбоев), не была выявлена выраженная зависимость от проектных норм. На рис.12 показаны результаты исследований АО "ЭНПО СПЭЛС": пороговые значения ЛПЭ тиристорного эффекта зависят прежде всего от особенностей конкретной интегральной схемы. Тиристорный эффект может возникать в любых технологиях с нормами от 28 до 90 нм.

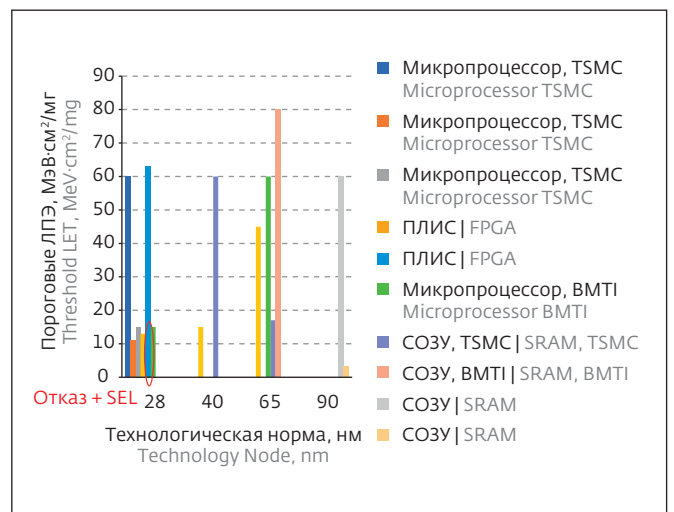


Рис.12. Зависимость пороговой ЛПЭ SEL от технологической нормы

Fig.12. SEL threshold LET dependence on the technology nodes

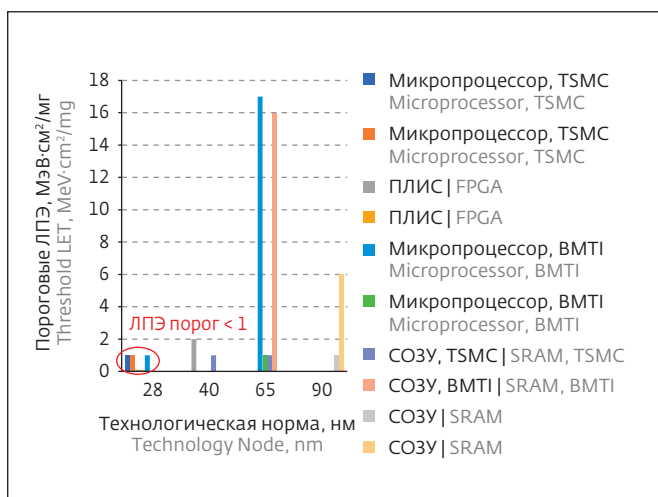


Рис.13. Зависимость пороговой ЛПЭ сбоев от технологической нормы

Fig.13. Upsets threshold LET dependence on the technology nodes

В отношении эффектов сбоев тенденция снижения пороговых ЛПЭ с ростом проектных норм также может нарушаться при использовании схмотехнических методов повышения РС. Теоретически, можно получить высокие пороговые значения ЛПЭ сбоев и для проектных норм 28 нм, хотя в нашей практике подобные изделия пока не встречались, и пороговые значения ЛПЭ варьировались от 0,1 до 1 МэВ·см²/мг (рис.13). Исследования стойкости 10-транзисторной и DICE [35] ячеек памяти для технологий с нормами менее 65 нм [36, 37] показали, что одна частица может воздействовать на несколько чувствительных объемов одновременно. Эта проблема может быть решена для FD SOI, как будет показано далее.

Эффекты повреждения подзатворных диэлектриков (Single Event Gate Rupture, SEGR) в КМОП-приборах с ультратонкими оксидами пока экспериментально не обнаружены. При этом в КМОП ПЛИС с нормой 28 нм экспериментально наблюдался катастрофический отказ, похожий на пробой (рис.12).

Помимо уменьшения критического заряда, при снижении проектных норм происходит также уменьшение размеров чувствительных областей, с которых элементы "собирают" радиационно-индуцированный заряд. Наиболее значительное уменьшение этих областей происходит при переходе к КНИ-технологиям при изоляции с помощью скрытого оксида. В результате при переходе к технологиям с меньшими проектными нормами наблюдается снижение сечения сбоев, несмотря

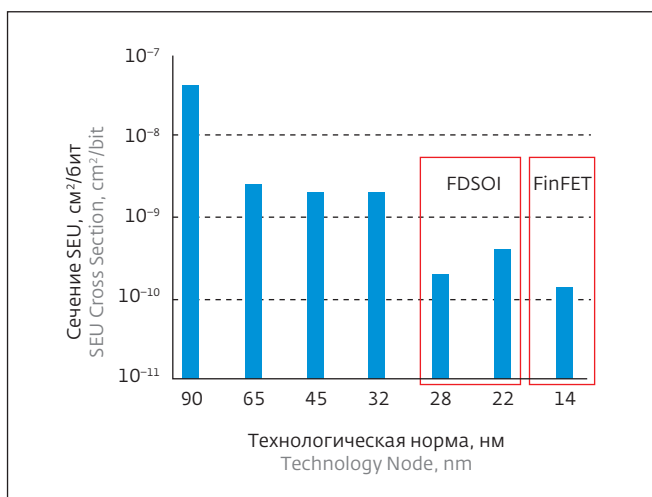


Рис.14. Зависимость сечения сбоев от технологической нормы (собственные данные и [9])

Fig.14. SEU cross sections dependence on the technology nodes (own data and data from [9])

на уменьшение критического заряда (рис.14). Также в КНИ-приборах доля многократных сбоев значительно сокращается из-за отсутствия собирания заряда соседними элементами. В приборах объемных технологий доля многократных сбоев составляла 90% и более, а в FD SOI – лишь десятые доли процента (рис.15) [38].

Таким образом, низкая вероятность многократных сбоев может обеспечить высокий уровень устойчивости (по частоте сбоев, но не по пороговой ЛПЭ) благодаря использованию помехоустойчивого кодирования и специальной схмотехники (например, DICE) [39].

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Требования РС, предъявляемые нормативной документацией и потребителями при разработке ЭКБ, определяют необходимость обеспечения и проверки соответствия изделий этим требованиям. Наиболее информативный инструмент для определения РС – радиационные испытания и исследования, которые должны проводиться на всех этапах жизненного цикла изделий – при разработке, производстве и эксплуатации (см. [40–42]). При этом для современных приборов с субмикронными проектными нормами можно отметить следующие тенденции развития системы испытаний для обеспечения и контроля РС.

Необходимость проведения радиационных исследований и испытаний на все более ранних этапах проектирования – часто пока изделие еще не разработано. При этом объектами исследований

являются прототипы, аналоги, тестовые структуры и бескорпусные полуфабрикаты изделий – ранее основной объем радиационных испытаний проводился на образцах готовых изделий на финише разработки. Предварительные исследования на ранних этапах создания особенно необходимы при разработке сложных систем, содержащих несколько чипов на одной пластине или в одном корпусе [43].

Необходимость характеристики базовых технологических процессов по радиационной стойкости с целью создания, адаптации и верификации радиационных моделей IP-блоков и библиотек элементов для САПР, а также идентификации их параметров, что необходимо для последующего радиационно-ориентированного проектирования изделий [44].

Необходимость мониторинга стабильности базовых технологических процессов по РС на основе исследований параметрических мониторов и схем контроля технологии [45, 46].

Необходимость контроля РС готовой продукции – в виде сплошного или выборочного, в том числе периодического, контроля партий пластин по РС [47–51], при этом объектами испытаний выступают типовые оценочные схемы (ТОС), в качестве которых могут быть приняты тестовые структуры, схемы контроля технологии или готовые изделия.

Необходимость сертификационных испытаний и входного контроля изделий в конкретных режимах и условиях их применения в аппаратуре. Уровни радиационных отказов в заданных режимах и условиях могут быть существенно выше нормативных уровней стойкости по ТУ, где указаны минимальные гарантированные уровни отказов в наихудшем случае, который может и не реализовываться в конкретной аппаратуре.

Каждый этап радиационных испытаний и исследований выдвигает специфические требования к радиационно-испытательным установкам, которые должны быть совместимы с автоматизированным оборудованием для информативного контроля работоспособности современных приборов по всем параметрам-критериям годности в реальных режимах и условиях функционирования, в том числе в диапазоне температур. Часть радиационных испытаний при разработке и производстве изделий необходимо проводить на пластинах с использованием зондовых устройств. Для испытаний готовых изделий требуется адаптация испытательных установок к новым структурам и конструктивам (BCA flip-chip, чиплеты, Fan-Out Wafer-Level Package и др.); новым используемым материалам (High-k диэлектрики, SiC, Al^{III}V^V и др.); к новой

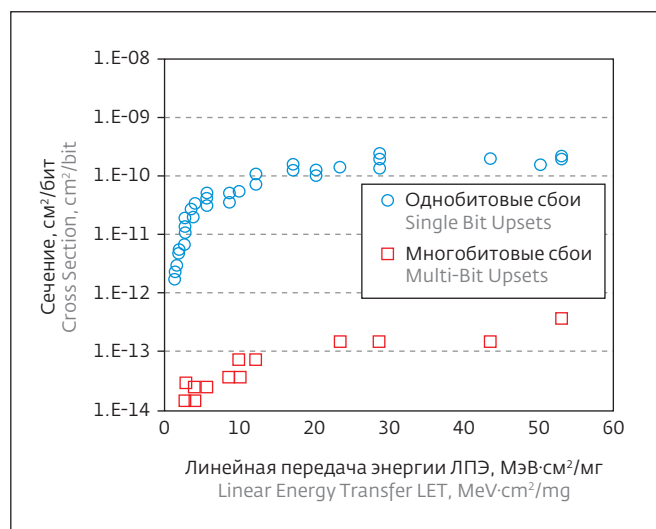


Рис.15. Однобитовые и многобитовые сбои

Fig.15. Single-Bit vs Multi-Bit Upsets

схемотехнике и архитектуре (многоуровневые микросхемы, nanosheets, МЭМС и др.).

Существующие радиационно-испытательные установки в общем случае позволяют провести базовый уровень испытаний ЭКБ, в том числе и новых субмикронных устройств [52].

Основной арсенал оборудования для испытания на дозовое воздействие включает:

- установки на базе изотопных источников ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs с интенсивностью от долей P/c до сотен P/c [53, 54, 55, 56];
- ускорители электронов с энергиями порядка единиц МэВ до 8 МэВ [55, 57];
- рентгеновские источники с максимальной энергией около 100...300 кэВ [55, 58, 59].

Набор установок для испытаний на воздействие отдельных ядерных частиц включает:

- ускорители ионов с энергиями порядка сотен МэВ/нуклон и длинами пробега в материале объекта от десяти до сотен микрон [60–62]. При использовании этих установок необходимо обеспечить прямой доступ ионов к чувствительной области объекта, поэтому испытания, как правило, проводятся в вакууме;
- ускорители протонов с энергиями частиц от десятков МэВ до единиц ГэВ [61, 63];
- источники сфокусированного лазерного излучения с корректно выбранной для каждого материала чувствительной области длиной волны (от ультрафиолетового до оптического и ближнего ИК-диапазона) и мощностью, обеспечивающими необходимую и достаточную степень



ионизации активных областей прибора, с длительностью импульса от 0,1 до 100 пс [64, 65]. Как и в случае ускорителей ионов, необходим оптический доступ к чувствительной области прибора, для чего проводится декапсуляция корпусов (как правило – со стороны подложки для парирования эффектов затенения активных областей приборов многослойной металлизацией), причем с сохранением работоспособности прибора.

С целью обеспечения максимальной информативности и взаимной верификации результатов целесообразно сочетать рентгеновское и гамма-испытательные воздействия для дозовых эффектов и лазерное сканирование с использованием ионов для одиночных эффектов. Полученные результаты должны учитывать различную неоднородность ионизации по глубине и площади кристалла для каждого вида испытательных воздействий и для каждой испытательной установки [66].

Необходимо отметить, что ни одна испытательная установка не воспроизводит в точности реальные радиационные воздействия в ходе эксплуатации ЭКБ, не является универсальной и достаточной для решения всех задач испытаний и только рациональный комплекс различных испытательных установок, контрольно-измерительного и обеспечивающего оборудования (и соответствующих методик и навыков) позволяет получить информативные и достоверные результаты испытаний.

Набор современных параметрических и функциональных тестеров ЭКБ должен быть адаптирован к объемам и условиям испытательных установок и особенностям испытываемых изделий, должен быть укомплектован необходимым программным обеспечением и набором кабелей, длина которых должна быть минимальной для снижения влияния наводок и помех, но достаточной для подключения испытуемого объекта в активном режиме к контрольно-измерительному оборудованию. Современные радиационные испытания являются высокоавтоматизированным и "интеллектуальными". Радиационные испытания должны проводиться при температуре окружающей среды в диапазоне $-60...+125$ °C, что требует соответствующих компактных нагревателей и охладителей, адаптированных под условия испытаний.

Как уже отмечалось ранее, во многих случаях требуется декапсуляция микросхемы с сохранением их функциональности и значений параметров, что также предъявляет требования к подготовке образцов и контрольно-измерительному оборудованию.

Все эти испытательные установки, аппаратное и программное обеспечение совместно с методиками, технологией и опытом формируют уникальную испытательную среду, по сути, экосистему, которая находится в постоянной эволюции, отслеживая и следуя за трендами развития микроэлектронных приборов.

В то же время особенности современных приборов (начиная со схемотехники и техпроцесса и заканчивая особенностями корпуса) часто ограничивают применимость традиционных испытательных установок и стимулируют развитие нового оборудования. Новые технологии систем в корпусе ограничивают доступ испытательных воздействий к активным областям изделий. Кроме того, для таких систем становится сложно определить "наиболее слабое звено", то есть наиболее радиационно-чувствительный компонент, определяющий отказ изделия в целом. Для таких приборов возможны ограничения по использованию рентгеновских источников для моделирования дозовых эффектов и источников лазерного излучения для моделирования одиночных событий, так как межсоединения из тяжелых металлов (Cu, Au, Mo) могут значительно исказить уровень накопленной дозы в чувствительной области из-за эффекта усиления дозы [67], а многоуровневая металлическая разводка формирует практически непрозрачный экран для лазерного излучения при облучении со стороны металлизации. Следовательно, лазерное облучение современных приборов, как правило, проводится со стороны подложки (при возможности).

Использование новых материалов требует расчета эффективности излучений различных испытательных установок для эквивалентного моделирования конкретного радиационного эффекта. Для каждой структуры следует выбрать наиболее эффективный инструментальный для исследования радиационных эффектов. Например, при использовании лазерного излучения для ионизации Si-активных областей рационально использовать длину волны в ближнем инфракрасном диапазоне, а для SiC-приборов – в ближнем УФ-диапазоне. Также необходимо выбирать параметры источников, исходя из особенностей современной схемотехники и топологии. Например, транзисторы на основе "нанолиста" (nanosheet) часто базируются на структуре InGaN, что требует учета новых материалов. Чтобы уменьшить влияние корпуса при испытаниях на ускорителе, следует использовать длиннопробежные ионы [68]. В то же время полученные данные могут

быть верифицированы источником протонов для исключения эффектов множественных сбоев. Дозовые эффекты в приборах относительно больших размеров из-за сборки нескольких кристаллов в один корпус и использования различных материалов требуют сочетания радиационных исследований с вычислительными методами и численным моделированием, например, с использованием комплекса GEANT4 [69].

ВЫВОДЫ

Переход к проектным нормам 28 нм и ниже сопровождается применением новых структур и материалов и связанными с этим значительными изменениями в механизмах радиационного поведения приборов, однако при этом высокие уровни РС могут быть вполне достижимы, часто – без существенных специальных усилий.

Высокая дозовая стойкость современных приборов на объемных КМОП-структурах часто определяется особенностями самого технологического процесса. Обеспечение дозовой стойкости приборов на КНИ-структурах часто требует применения специальных методов, таких как подача компенсирующего отрицательного потенциала на подложку.

Естественное снижение сечений одиночных сбоев достигается за счет масштабирования технологии, что особенно заметно в современных приборах на КНИ-структурах, для которых не характерны многократные сбои. Пороговые ЛПЭ также уменьшаются, при этом возникают новые механизмы взаимодействия ИИ с веществом, которые ранее не проявлялись.

Таким образом на этапе создания новых субмикронных структур и приборов на их основе необходимо провести расчетно-экспериментальный анализ их чувствительности к основным радиационным эффектам и особенностей их радиационного поведения, а также развитие и адаптацию испытательной инфраструктуры для получения достоверных и информативных результатов радиационных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Dennard R.H., Gaensslen F.H., Yu H.N., Rideout V.L., Bassous E., and Leblanc A.R. Design of Ion-Implanted MOSFET's With Very Small Physical Dimensions // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1974, vol. 9, no. 5, pp. 256–268.
2. Patton G. Collaboration as a Way forward for Semiconductor Technology – Albany NanoTech. Albany Innovation Conference, 2013.
3. Gelsinger P. Intel accelerated 2021 presentation.
4. Chau R. Process and Packaging Innovations for Moore's Law Continuation and beyond // *Technical Digest – International Electron Devices Meeting, IEDM*, vol. 2019 December, dec 2019.
5. Naffziger S., Lepak K., Paraschou M., and Subramony M. 2.2 AMD chiplet architecture for high-performance server and desktop products / in 2020 IEEE International SolidState Circuits Conference – (ISSCC), 2020, pp. 44–45.
6. Powell W. High-Performance Spaceflight Computing (HPSC) Program Overview. Space Computing & Connected Enterprise Resiliency Conference (SCCERC), 2018.
7. Nikiforov A., Boychenko D.V., Telets V., Smolin A., Elesin V., Ulanova A., and Kessarinskiy L. Basic trends in electronic components product range development: Radiation hardness aspects / in 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), 2017, pp. 45–48.
8. Petrov A.G., Nikiforov A.Y., Boruzdina A.B., Ulanova A.V., and Yanenko A.V. Memory chips and units radiation tolerance dependence on supply voltage during irradiation and test / *Facta universitatis – series: Electronics and Energetics*, 2018, vol. 31, no. 1, pp. 131–140.
9. Palkuti L., Alles M., and Hughes H. The role of radiation effects in SOI technology development / in SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S), 2014 IEEE, pp. 1–2, 2014.
10. Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Schwank J.R., and Felix J. A., "Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 1747–1763.
11. Faccio F., Cervelli G. Radiation-induced edge effects in deep submicron CMOS transistors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, vol. 52, no. 6, pp. 2413–2420.
12. Faccio F., Michelis S., Cornale D., Paccagnella A., and Gerardin S. Radiation-Induced Short Channel (RISCE) and Narrow Channel (RINCE) Effects in 65 and 130 nm MOSFETs // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, vol. 62, no. 6, pp. 2933–2940.
13. Faccio F., Borghello G., Lerario E., Fleetwood D.M., Schrimpf R.D., Gong H., Zhang E.X., Wang P., Michelis S., Gerardin S., Paccagnella A., and Bonaldo S. Influence of LDD Spacers and H⁺ Transport on the Total-IonizingDose Response of 65-nm MOSFETs Irradiated to Ultra-high Doses // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, pp. 164–174, 2018.

14. **Borghello G.** Ionizing radiation effects in nanoscale CMOS technologies exposed to ultra-high doses. PhD thesis, University of Udine, 2019.
15. **Paillet P., Gaillardin M., Ferlet-Cavrois V., Torres A., Faynot O., Jahan C., Tosti L., and Cristoloveanu S.** "Total ionizing dose effects on deca-nanometer fully depleted soi devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2345-2352, 2005.
16. **Gaillardin M., Martinez M., Paillet P., Raine M., Andrieu F., Faynot O., and Thomas O.** "Total ionizing dose effects mitigation strategy for nanoscaled FDSOI technologies," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, pp. 3023-3029, dec 2014.
17. **Chatterjee I., Zhang E.X., Bhuva B.L., Reed R.A., Alles M.L., Mahatme N.N., Ball D.R., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Linten D., Simoen E., Mitard J., and Claeys C.** "Geometry dependence of total-dose effects in bulk FinFETs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, pp. 2951-2958, dec 2014.
18. **King M.P., Wu X., Eller M., Samavedam S., Shaneyfelt M.R., Silva A.I., Draper B.L., Rice W.C., Meisenheimer T.L., Felix J.A., Zhang E.X., Haeffner T.D., Ball D.R., Shetler K.J., Alles M.L., Kauppila J.S., and Massengill L.W.** "Analysis of TID Process, Geometry, and Bias Condition Dependence in 14-nm FinFETs and Implications for RF and SRAM Performance," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, pp. 285-292, 2017.
19. **Hughes H., McMarr P., Alles M., Zhang E., Arutt C., Doris B., Liu D., Southwick R., and Oldiges P.** "Total ionizing dose radiation effects on 14 nm FinFET and SOI UTBB technologies," *IEEE Radiation Effects Data Workshop*, vol. 2015-November, 2015.
20. **Gaillardin M., Paillet P., Ferlet-Cavrois V., Faynot O., Jahan C., and Cristoloveanu S.** "Total ionizing dose effects on triple-gate fets," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, no. 6, pp. 3158-3165, 2006.
21. **Yang L., Zhang Q., Huang Y., Zheng Z., Li B., Li B., Zhang X., Zhu H., Yin H., Guo Q., Luo J. and Han Z.** "Total Ionizing Dose Response and Annealing Behavior of Bulk nFinFETs with ON-State Bias Irradiation," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, pp. 1503-1510, 2018.
22. **Afanas'ev V.V., Stesmans A.** "Stable trapping of electrons and holes in deposited insulating oxides: Al₂O₃, ZrO₂, and HfO₂," *Journal of Applied Physics*, vol. 95, p. 2518, 2004.
23. **Duan G.X., Zhang C.X., Zhang E.X., Hachtel J., Fleetwood D.M., Schrimpf R.D., Reed R.A., Alles M.L., Pantelides S.T., Bersuker G., and Young C.D.** "Bias dependence of total ionizing dose effects in SiGe-SiO₂HfO₂ pMOS FinFETs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, pp. 2834-2838, 2014.
24. **Dixit S.K., Zhou X.J., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Pantelides S.T., Choi R., Bersuker G., and Feldman L.C.** "Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO₂-based mosfets," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 54, no. 6, pp. 1883-1890, 2007.
25. **Zhang E.X., Fleetwood D.M., Hachtel J.A., Liang C., Reed R.A., Alles M.L., Schrimpf R.D., Linten D., Mitard J., Chisholm M.F., and Pantelides S.T.** "Total Ionizing Dose Effects on Strained Ge pMOS FinFETs on Bulk Si," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, pp. 226-232, 2017.
26. **Ni K., Zhang E.X., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Reed R.A., Alles M.L., Lin J., and Del Alamo J.A.** "Gate Bias and Geometry Dependence of Total-Ionizing-Dose Effects in InGaAs Quantum-Well MOSFETs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, pp. 239-244, 2017.
27. **Zhang C.X., Wang B., Duan G.X., Zhang E.X., Fleetwood D.M., Alles M.L., Schrimpf R.D., Rooney A.P., Khestanova E., Auton G., Gorbachev R.V., Haigh S.J., and Pantelides S.T.** "Total ionizing dose effects on hBN encapsulated graphene devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, pp. 2868-2873, 2014.
28. **McMorrow J.J., Cress C.D., Gavia Rojas W.A., Geier M.L., Marks T.J., and Hersam M.C.** "Radiation-Hard Complementary Integrated Circuits Based on Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes," *ACS Nano*, vol. 11, pp. 2992-3000, mar 2017.
29. **Liang C.D., Ma R., Su Y., O'Hara A., Zhang E.X., Alles M.L., Wang P., Zhao S.E., Pantelides S.T., Koester S.J., Schrimpf R.D., and Fleetwood D.M.** "Defects and Low-Frequency Noise in Irradiated Black Phosphorus MOSFETs With HfO₂ Gate Dielectrics," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, pp. 1227-1238, 2018.
30. **Massengill L.W., Bhuva B.L., Holman W.T., Alles M.L., and Loveless T.D.** "Technology scaling and soft error reliability," in *2012 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, pp. 3C.1.1-3C.1.7, 2012.



31. Sierawski B.D., Pellish J.A., Reed R.A., Schrimpf R.D., Warren K.M., Weller R.A., Mendenhall M.H., Black J.D., Tipton A.D., Xapsos M.A., Baumann R.C., Deng X., Campola M.J., Friendlich M.R., Kim H.S., Phan A.M., and Seidleck C.M. "Impact of low-energy proton induced upsets on test methods and rate predictions," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 6, pp. 3085-3092, 2009.
32. Sierawski B.D., Mendenhall M.H., Reed R.A., Clemens M.A., Weller R.A., Schrimpf R.D., Blackmore E.W., Trinczek M., Hitti B., Pellish J.A., Baumann R.C., Wen S., Wong R., and Tam N. "Muon-induced single event upsets in deep-submicron technology," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 6, pp. 3273-3278, 2010.
33. Schwank J., Shaneyfelt M., Baggio J., Dodd P., Felix J., Ferlet-Cavrois V., Paillet P., Lambert D., Sexton F., Hash G., and Blackmore E. "Effects of particle energy on proton-induced single-event latchup," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2622-2629, 2005.
34. Reed R.A., Weller R.A., Mendenhall M.H., Lauenstein J., Warren K.M., Pellish J.A., Schrimpf R.D., Sierawski B.D., Massengill L.W., Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Felix J.A., Schwank J.R., Haddad N.F., Lawrence R.K., Bowman J.H., and Conde R. "Impact of ion energy and species on single event effects analysis," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 54, no. 6, pp. 2312-2321, 2007.
35. Calin T., Nicolaidis M., and Velazco R. "Upset hardened memory design for submicron cmos technology," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 6, pp. 2874-2878, 1996.
36. Katunin Y.V., Stenin V.Y., and Antonyuk A.V. "Design of logical elements with single-event compensation for the 28-nm cmos decoders," in 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR), pp. 1-4, 2016.
37. Stenin V.Y., Stepanov P.V. "The static ram on dice cells spaced onto two groups," in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6, 2017.
38. Casey M.C., Stansberry S., Seidlick C., Maharrey J., Gamboa D., Pellish J., and LaBel K.A. A First Look at 22 nm FDSOI SRAM Single-Event Test Results. SEEMAPLD Single Event Effects (SEE) Symposium/Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD) Workshop, 2018.
39. Gorbunov M.S. "Design of fault-tolerant microprocessors for space applications," *Acta Astronautica*, vol. 163, 2019, pp. 252-258.
40. MIL-STD-883.
41. ESCC Specification 25100.
42. ESCC Specification 22900.
43. Kalashnikov O.A., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chukov G.V., and Elesin V.V. "System-on-chip: Specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness," *Russian Microelectronics*, vol. 45, pp. 33-40, Jan 2016.
44. Sotskov D.I., Usachev N.A., Elesin V.V., Metelkin I.O., Zhidkov N.M., and Nikiforov A.Y. "Compact models for radiation hardening by design of SiGe BiCMOS, GaAs and SOI CMOS microwave circuits," in 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-5, 2021.
45. Московская Ю.М. Прогнозный контроль радиационной стойкости БИС с учетом стабильности производства. Тезисы докладов 18 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем "Стойкость 2015". Научно-технический сборник.
46. Moskovskaya Y.M., Nikiforov A.Y., Bobrovskiy D.V., Ulanova A.V., Zhukov A.A. Process Parameters Variations Influence on CMOS IC's Hardness to total Ionizing Dose 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL).
47. Московская Ю.М. Прогнозный контроль радиационной стойкости БИС с учетом стабильности производства. Тезисы докладов 18 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем "Стойкость 2015". Научно-технический сборник.
48. Московская Ю.М. Общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полужаказных БИС на их основе. Наноиндустрия. 2017, № 1, С. 50-59.
49. Московская Ю.М. Контроль радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе серийного производства: варианты и критерии выбора оптимального методического подхода. Сборник трудов форума "Микроэлектроника-2018", Республика Крым, г Алушта, 01-06 октября 2018 г., Москва: 2018, с. 180-184.



50. **Московская Ю.М., Денисов А.Н., Федоров Р.А., Никифоров А.Ю., Уланова А.В., Бобровский Д.В.** Состав и принцип формирования типовой оценочной схемы для оценки радиационной стойкости базовых матричных кристаллов и полупроводниковых БИС на их основе. Наноиндустрия, 2017. Выпуск 1, стр. 60-69.
51. **Bogdanov Yu.I., Bogdanova N.A., Fastovets D.V., Moskovskaya Y.M., Sogojan A.V., Nikiforov A.Y.** Nonparametric Statistical Analysis of Radiation Hardness Threshold Variation in CMOS IC Wafer Lots Series with the Aim of Process Monitoring. IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL), 2019.
52. **Baumann R., Kruckmeyer K.** Radiation handbook for electronics. Texas Instruments, 2020.
53. **Humphreys J.C., Dozier C.M.** Cobalt-60 facilities for radiation assurance testing. National bureau of standards, 1986.
54. **Artamonov A.S., Sangalov A.A., Nikiforov A.Y., Telets V.A., and Boychenko D.V.** "The new gamma irradiation facility at the national research nuclear university mephi," in 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), pp. 1-4, 2014.
55. **Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Dodd P.E.** "Radiation hardness assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: Radiation environments, physical mechanisms, and foundations for hardness assurance," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, no. 3, pp. 2074-2100, 2013.
56. **Boychenko D., Kalashnikov O., Nikiforov A., Ulanova A., Bobrovsky D., Nekrasov P.** "Total ionizing dose effects and radiation testing," Facta universitatis - series: Electronics and Energetics, vol. 28, no. 1, pp. 153-164, 2015.
57. **LaBel K.A.** External Radiation Test Facilities for Testing of Electronics: NASA Overview with Emphasis on Single Event Effects (SEE). Presentation at the Study on Space Radiation Effects Test Infrastructure (Electronics) Meeting, Washington DC, 2017.
58. **Sogoyan A.V., Artamonov A.S., Nikiforov A.Y., Boychenko D.V.** "Method for integrated circuits total ionizing dose hardness testing based on combined gamma and X-ray irradiation facilities," Facta universitatis - series: Electronics and Energetics, vol. 27, no. 3, pp. 329-338, 2014.
59. **Kessarinskiy L.N., Boychenko D.V., Petrov A.G., Nekrasov P.V., Sogoyan A.V., Anashin V.S., Chubunov P.A.** "Compendium of typical comparative results under X-ray, gamma and linac irradiation," in 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), pp. 1-3, 2014.
60. **Kalagin I.V., Gulbekyan G.G., Gikal B.N., Mitrofanov S.V., Skuratov V.A., Teterev Y.G., Anashin V.S.** "Using the flnr accelerator complex for see testing: State of art and future development," in 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), pp. 1-6, 2015.
61. **Petersen E.** Single Event Effects in Aerospace. Wiley-IEEE Press, 2011.
62. **Boatella Polo C.** Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications. ESA-CERN-SCC Workshop, 2017.
63. **Gencer A., Yi`gito`glu M., Bilge Demirk`oz M., Efthymiopoulos I.** "A proton irradiation test facility for space research in Ankara, Turkey," in 41st COSPAR Scientific Assembly, vol. 41, pp. F2.3-2-16, 2016.
64. **Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Telets V.A., Yanenko A.V.** "Femtosecond laser simulation facility for see ic testing," in 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), pp. 1-4, 2014.
65. **Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V.** "Local laser irradiation technique for see testing of ics," in 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, pp. 449-453, 2011.
66. **Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Merkushev O.V., Davydov G.G., Marfin V.A.** "Nonuniform optical losses in laser see tests," in 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), pp. 1-4, 2015.
67. **Kelly J.G., Luera T.F., Posey L.D., Vehar D.W., Brown D.B., Dozier C.M.** "Dose enhancement effects in mosfet ic's exposed in typical 60co facilities," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 30, no. 6, pp. 4388-4393, 1983.
68. **Buchner S., McMorro D.** Overview of Single Event Effects. SERESSA 2015, Puebla, Mexico, 2015.
69. GEANT4 Physics Reference Manual.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ИНДУСТРИИ



XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
LABComplex

АНАЛИТИКА ЛАБОРАТОРИЯ БИОТЕХНОЛОГИИ HI-TECH

При поддержке:  Комитетов Верховной Рады Украины
Министерств и ведомств
Профильных ассоциаций и объединений

Организаторы:  

ВНИМАНИЕ! НОВОЕ МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ



Выставочный Центр «КиевЭкспоПлаза»
Киевская область, с. Берёзовка, ул. Амстердамская, 1

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРИЙ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ, ЛАБОРАТОРНОЕ, ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ И УСЛУГИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРИЙ

ТОРГОВЫХ МАРОК,
МИРОВЫХ БРЕНДОВ

270

**19-21
ОКТЯБРЯ
2021**

25

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ
МЕРОПРИЯТИЙ

ПОСЕТИТЕЛЕЙ

5 000

250

ДОКЛАДЧИКОВ

МЕЖДУНАРОДНОЕ УЧАСТИЕ И ПОСЕЩЕНИЕ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ И БИЗНЕС ПРОГРАММЫ,
МАСТЕР-КЛАССЫ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ

По вопросам участия в выставке:

+38 (067) 647-67-06

+38 (099) 532-40-35

lab@lmt.kiev.ua



По вопросам участия в

научно-практической программе:

+38 (067) 427-38-86

marketing@labcomplex.com

www.labcomplex.com