

УДК 621.383.52:539.12.04

DOI: 10.36845/2073-8250-2019-255-4-16-26

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ МИКРОСХЕМ СТАТИЧЕСКИХ ОЗУ НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»

**Ю. А. Кабальнов**

*Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС № 486*

*По результатам моделирования радиационных эффектов в транзисторах на структурах «кремний на сапфире» создана технология изготовления микросхем статических ОЗУ с уровнями стойкости по дозе и мощности дозы ионизирующего излучения, соответствующими требованиям к устройствам бортовой аппаратуры. Созданные в процессе разработки стенды и методики исследований на основе лазерного и рентгеновского имитаторов обеспечили возможность оценки фактических уровней стойкости тестовых структур и интегральных схем. Испытания микросхем на моделирующих установках и имитационных комплексах показали сопоставимые результаты по уровням стойкости.*

**Ключевые слова:** *структуры «кремний на сапфире», технология изготовления, микросхемы ОЗУ, ионизирующее излучение, радиационная стойкость*

**Сведения об авторах:** *Кабальнов Юрий Аркадьевич, к.т.н., kabalnov@niis.nnov.ru*

## DEVELOPMENT OF THE FABRICATION METHOD FOR STATIC RAM RADIATION HARDENED SILICON-ON-SAPPHIRE MICROCIRCUITS

**Yu.A. Kabalnov**

*Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics» «Yu.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems» 603950, Nizhniy Novgorod, box №486*

*This paper presents the fabrication method for static RAM microcircuits with ionizing radiation dose and dose-rate resistance level corresponding to the requirements for airborne equipment. Method is developed on the basis of simulation of radiation effect in silicon-on-sapphire transistors. Test benches and research methods made during the research based on laser and X-ray simulators provided the possibility to evaluate actual resistance levels of devices under test and integrated circuits. Microcircuits testing performed on simulation installations shown comparable results in terms of resistance levels.*

**Keywords:** *silicon on sapphire (SOS) structures, fabrication method, RAM microcircuits, ionizing radiation, radiation resistance*

**Authors:** *Kabalnov Yury Arkadyevich, Ph.D., kabalnov@niis.nnov.ru*

Создание микросхем запоминающих устройств, обеспечивающих сохранность информации при уровнях радиационного воздействия, соответствующих требованиям к радиационно стойким устройствам систем управления бортовой аппаратуры специального назначения, является актуальной задачей. Трудности обеспечения сбоеустойчивости по эффектам мощности поглощённой дозы для схем статических ОЗУ, изготовленных на объёмном кремнии или кремниевых эпитаксиальных структурах, обусловлены паразитными электрическими связями через подложку. Применение гетероэпитаксиальных кремниевых структур с диэлектрической изоляцией способствует уменьшению ионизационных токов и снижению паразитных связей между элементами схем при радиационных воздействиях. Это обуславливает возможность использования их при изготовлении радиационно стойкой элементной базы.

Вместе с тем наличие дополнительной «нижней» границы раздела области кремния и диэлектрической подложки в МОП транзисторах на структурах с диэлектрической изоляцией определяет повышенную чувствительность микросхем к дозовым эффектам как при стационарных, так и при импульсных радиационных воздействиях. Уровень стойкости серийно выпускаемых отечественных микросхем статических ОЗУ на структурах «кремний на сапфире» (КНС) при испытаниях на моделирующих установках не всегда соответствует декларируемому в технических условиях, что определяется нестабильностью характеристик границы раздела кремний–сапфир.

В работе представлен опыт разработки технологии изготовления статических ОЗУ на КНС структурах с уровнями стойкости по дозе и мощности дозы ионизирующего излучения, отвечающих требованиям к бортовой аппаратуре специального назначения.

### ***Анализ радиационных эффектов в элементах схем на КНС структурах***

Исследованиям ионизационной реакции микросхем запоминающих устройств посвящены работы многих авторов [1-3]. Однако наряду со сбоеустойчивостью к микросхемам ОЗУ бортовой аппаратуры выдвигаются требования и по обеспечению высокого уровня дозовой стойкости. Применение КНС структур с гетероэпитаксиальным слоем кремния 0.3 мкм обуславливает снижение ионизационных токов в элементах схем. Вместе с тем малая толщина приборного слоя в сравнении с плёнками толщиной 0.6 мкм определяет повышенную дефектность активных областей МОП транзисторов. Исследования структур КНС с помощью рентгеновской и электронной спектроскопии [4, 5] свидетельствуют о высокой концентрации дефектов в слоях кремния, особенно в областях, граничащих с диэлектрической подложкой. Снизить их концентрацию оптимизацией режимов эпитаксиального роста и варьированием направления среза сапфира не удаётся из-за несоответствия параметров кристаллических решёток кремния и сапфира. Возникающие механические напряжения на границе раздела релаксируют с образованием сетки дислокаций. Существует несколько моделей

интерфейса в гетероэпитаксиальных системах КНС, связанных со структурными свойствами кремния на границе с сапфиром, – так называемые когерентные, полукogerентные и некогерентные. В разное время предлагались различные модели интерфейса, но однозначного мнения по поводу типа структуры гетероэпитаксиального интерфейса систем КНС до настоящего времени нет. Следует учитывать, что термические операции при изготовлении микросхем могут активировать процессы перестройки структуры границы раздела. Важно, как показывают исследования [4, 5], что структура приграничных слоёв сапфира в процессе эпитаксиального роста остаётся достаточно совершенной. Поэтому для снижения тока по паразитным каналам утечек по границе раздела кремний–сапфир процесс изготовления ИС не должен приводить к повышению дефектности диэлектрика и, как следствие, росту концентрации встроенного в диэлектрик заряда. Следовательно, наряду со стойкостью к мощности поглощённой дозы ионизирующего излучения для обеспечения также и дозовой стойкости требуется оптимизация конструкции элементов схемы и технологии изготовления.

В литературе [2] дозовые эффекты и эффекты мощности дозы ионизирующего излучения рассматриваются независимо. Проводится отдельная оценка стойкости микросхем по указанным группам эффектов. Вместе с тем следует учитывать, что с ростом мощности импульсного ионизирующего излучения указанные воздействующие факторы в той или иной степени могут активировать аналогичные паразитные каналы утечек элементов схем.

Дозовая стойкость, по литературным данным [2], в основном определяется утечками по паразитному каналу на границе раздела кремний–сапфир, который формируется в результате накопления заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях при наборе дозы гамма-излучения. Критерияльными параметрами для дозовой стойкости микросхем статических ОЗУ служат токи потребления в режиме хранения, которые растут с ростом накопленной дозы. Однако при высоких уровнях импульсного воздействия растёт импульсная реакция элементов схем, и вклад ионизационной проводимости сапфировых подложек становится сравнимым с вкладом активных областей структур. Ионизационная проводимость сапфира может оказывать влияние на состояние границы раздела кремний–сапфир. Об этом свидетельствуют возможные остаточные явления, связанные с деградацией характеристик микросхем после снижения уровня наведённых токов при импульсных ионизирующих воздействиях. Проведение испытаний микросхем на радиационную стойкость, разработка конструкции и технологии их изготовления выполнялись с учётом эффектов воздействия обоих факторов.

Критичные для снижения утечек по паразитным каналам технологические режимы формирования кристаллов микросхем определялись по результатам исследования параметров тестовых структур с применением лазерного и рентгеновского имитаторов, а также при использовании результатов моделирования, доминирующих в элементах схем, эффектов дозовых и импульсных нагрузок.

С использованием компьютерной программы для расчёта транспорта электронов в МОП КНС транзисторах в двумерном квазигидродинамическом приближении с предложенными в работе [6] подходами к моделированию радиационных эффектов рассматривались процессы протекания тока в транзисторах до и после гамма-облучения. Расчёты были выполнены с использованием модели *n*-канальной транзисторной структуры как наиболее чувствительной к воздействию гамма-облучения спектра деления со средней энергией квантов  $\sim 1$  МэВ. В модели учитывались характеристики границ раздела кремний–сапфир и подзатворной границы кремний–двуокись кремния. Основными уравнениями, определяющими транспорт носителей заряда, являлись уравнения Пуассона, непрерывности, баланса энергии и импульса носителей заряда и выражения для плотности тока и потока энергии электронов. Настройку модели выполняли на основе сопоставления результатов расчёта с экспериментальными вольт-амперными характеристиками транзисторов путём варьирования профилей легирования и подвижности электронов, а также концентрации акцепторов в *p*-кармане. Учёт накопления зарядов в слоях диэлектриков транзисторных структур при воздействии гамма-излучения выполнялся посредством введения зарядов в ячейки расчётной сетки. Рассматривались два вида распределения зарядов: неоднородное распределение по границе раздела кремний–сапфир пропорционально распределению поля от истока к стоку и однородное распределение, характерное для высоких уровней ионизирующего воздействия.

Расчёты показали образование вблизи границы раздела кремний–сапфир проводящего канала, при этом концентрация неподвижных положительно заряженных поверхностных состояний на границе раздела может достигать значений  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в пересчёте на объёмную концентрацию. По результатам расчётов концентрация неподвижных зарядов при радиационных воздействиях может возрасти в 1.5 раза. Был выполнен расчёт зависимости тока стока от концентрации акцепторов в *p*-кармане транзисторов. В сапфир при этом вводился заряд с концентрацией  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , распределённый равномерно и неравномерно пропорционально напряжённости электрического поля.

На рис. 1 представлена зависимость величины прироста тока стока транзисторов после воздействия гамма-облучения (состояние «закрыто») от концентрации примеси в *p*-кармане с равномерным и неравномерным распределением встроенного заряда. Сопоставление графиков показывает, что при равномерном распределении заряда (2) величина прироста тока стока за счёт встроенного заряда значительно выше, чем при распределении заряда пропорционально напряжённости электрического поля. Вместе с тем важно, что величины токов с увеличением концентрации примеси в *p*-кармане снижаются и при концентрациях  $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  имеют минимальные значения для обеих зависимостей (1) и (2). Начиная с уровня легирования  $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , дальнейшее увеличение концентрации слабо сказывается на радиационной чувствительности тока стока.

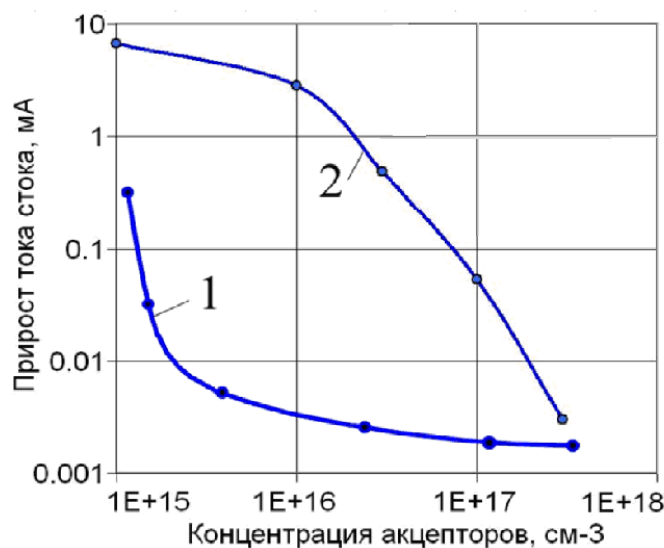


Рис. 1

*Зависимость величины прироста тока стока транзисторов после воздействия гамма-облучения от концентрации акцепторов в  $p$ -кармане при неравномерном (1) и равномерном (2) распределении заряда в сапфире*

Высокие уровни мощности дозы ионизирующего излучения способствуют эффектам «заливания»  $p$ - $n$  переходов носителями заряда и обуславливают формирование паразитных биполярных транзисторов в МОП КНС структурах. Моделирование распределения электронов в транзисторах показывает наличие утечек через паразитный биполярный транзистор даже с учётом малого времени жизни неосновных носителей заряда, характерного для гетероэпитаксиальных слоёв кремния. Оптимизация режимов легирования  $p$ -кармана как области истокового  $p$ - $n$  перехода обуславливает снижение коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора.

Технологические решения обрабатывались на тестовых структурах с контролем их импульсных и дозовых характеристик с использованием лазерных и рентгеновских имитаторов. Разработанные стенды

и методики исследований на основе лазерного и рентгеновского имитаторов обеспечили оценки уровней стойкости в расширенном объёме электрических и температурных режимов с полным контролем электрических параметров и функционирования. Различие в длине волны и энергии квантов гамма-излучения и излучения лазера может привести к ошибке в определении стойкости микросхем при максимальных уровнях мощности дозы. Однако проведённый анализ результатов исследований позволил установить соответствие характера ионизационных откликов параметров микросхем (ток потребления, выходное напряжение, время потери работоспособности) при воздействии излучения лазерных имитаторов и высокоэнергетического излучения моделирующей установки в широком диапазоне мощности дозы. Это свидетельствует об идентичности

ионизационных процессов генерации, переноса носителей заряда, рекомбинации неосновных носителей, ответственных за формирование импульсной реакции параметров микросхем. Основной проблемой лазерного имитационного моделирования ионизационных эффектов являются недостаточно высокие достигаемые уровни эквивалентного воздействия, обусловленные потерями энергии лазерного излучения за счёт его отражения металлизированными слоями. В соответствии с экспериментальными данными решение задачи возможно с учётом имеющихся требований к равномерности энерговыделения на поверхности кристаллов микросхем при использовании лазерного излучения с меньшей длиной волны  $\sim 532$  нм. За счёт большего коэффициента поглощения излучения в кремнии достигнутый уровень эквивалентного воздействия может быть значительно увеличен.

На рис. 2 показана зависимость амплитуды импульсного тока потребления двух модификаций инверторов с различными режимами формирования LDD структур транзисторов от температуры окружающей среды. Образец (1) легирован с более

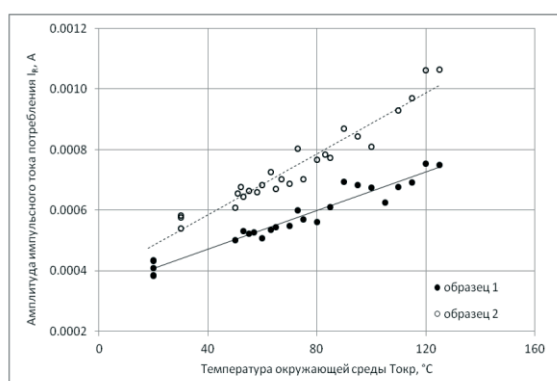


Рис. 2

Зависимость амплитуды импульсного тока потребления инверторов от температуры

высокой концентрацией примеси в области LDD в отличие от образца (2). Ход кривых показывает, что от величины дозы имплантации LDD структур транзисторов зависит стойкость инверторов к импульсному ионизирующему излучению.

Исследования ионизационных эффектов, выполненные на рентгеновских имитаторах, показали, что конденсаторы элементарных транзисторных ячеек памяти с обкладками  $p$ -типа проводимости менее чувствительны к большим дозам облучения в отличие от конденсаторов с  $n$ + обкладками.

### Элементы конструкции и технология изготовления микросхем ОЗУ

В работе использовались элементы конструкции, хорошо зарекомендовавшие себя при разработке схем ОЗУ. Для повышения сбоеустойчивости эффективны десятитранзисторные ячейки памяти с 4-мя  $p$ -канальными и 6-ю  $n$ -канальными транзисторами. Конструктивно ячейки памяти выполняются симметрично относительно RC-цепи. Конденсатор в RC-цепи подключён параллельно между входами триггера с развязкой резисторами входов и выходов. Для повышения сопротивления резисторов их выполняют в блоке  $p$ -охрана. Обкладки конденсатора  $p$ -типа изготавливают в отдельном технологическом блоке. При разработке топологии блоков ИС используются преимущественно кольцевые транзисторы, обеспечивающие максимальный уровень стойкости. В ячейках памяти и в дешифраторах применяются полосковые транзисторы, занимающие меньшую площадь и обеспечивающие более высокое быстродействие. Для обеспечения

необходимого уровня стойкости латеральные области  $n$ -канальных полосковых транзисторов имплантируются ионами бора в отдельном фотолитографическом блоке.

При изготовлении схем ОЗУ использовались выращенные из газовой фазы гетероэпитаксиальные структуры кремния ориентации (100) на подложках из монокристаллического сапфира ориентации (-1012) (так называемый R-срез) с толщиной слоя кремния 0.3 мкм. Структуры контролировались по ряду параметров: величине прогиба; толщине слоя кремния; удельному сопротивлению; типу проводимости, включая границу раздела; кристаллическому совершенству, измеренному методом обратного рассеяния УФ-излучения. Данные параметры контролировались как технологические для обеспечения изготовления годных схем по маршруту. Не было отмечено непосредственной зависимости импульсной и дозовой стойкости микросхем от их дисперсии.

Режимы проведения технологических операций и маршрут изготовления в целом моделировались с использованием технологической САПР TCAD. Калибровка моделей выполнялась с привязкой к действующему оборудованию технологической линейки. Критериями параметрами служили пороговые и пробивные напряжения транзисторов, а также их драйверные токи. Критерием достоверности настройки моделей служило совпадение рассчитанных и измеренных характеристик структур в пределах ошибки измерений. Моделирование операций маршрута изготовления микросхем ОЗУ выполнялось с учётом результатов анализа радиационных эффектов.

Критичной для обеспечения импульсной и дозовой стойкости являлась операция формирования  $p$ -кармана  $n$ -канальных транзисторов. Для подавления токов утечки по паразитному каналу на границе активной области кремния и сапфира необходимый уровень легирования кремния акцепторами составляет  $\sim 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  с условием минимальных повреждений диэлектрика. Легирование в область  $p$ -кармана выполнялось имплантацией бором с дозой не менее  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . С целью исключения легирования эпитаксиальных плёнок кремния алюминием из сапфировой подложки в области границы раздела термический отжиг радиационных дефектов проводился при температуре не выше 900 °С. Для получения проецированного пробега с максимумом концентрации распределения примеси в слое кремния и снижения плотности поверхностных состояний и ловушек в сапфире энергия ионов бора при имплантации не превышала 70 кэВ.

Для уменьшения коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора, обусловленного ионизационными токами в подзатворной области при импульсном ионизирующем облучении, легирование  $p$ -кармана выполняли в три стадии. Выполняли две имплантации бором с повышением энергии ионов и имплантацию ионами  $\text{BF}_2^+$ . После термической активации распределение примеси по глубине истокового  $p$ - $n$  перехода было равномерным с концентрацией не менее  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Также, чтобы снизить импульсные токи потребления, LDD структуры транзисторов легировали дозами не менее  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Кристаллы микросхем изготавливали по технологическому маршруту с использованием операций фотолитографии, осаждения диэлектрических и проводящих слоёв, операций ионного легирования, термических обработок и плазмохимического травления.

Схематично маршрут изготовления микросхемы статического ОЗУ с микронными проектными нормами можно описать несколькими основными блоками технологических операций.

Блок 1 Формирование «активных» областей структур, плазмохимическое травление кремния
Блок 2 Импламентация области $n$ - и $p$ -карманов транзисторов
Блок 3 Импламентация области обкладки конденсаторов
Блок 4 Импламентация области $p$ -охраны
Блок 5 Формирование затвора пирогенным окислением и осаждением поликремния
Блок 6 Формирование $n^-$ , $n^+$ , $p^-$ , $p^+$ -областей истоков/стоков транзисторов
Блок 7 Формирование металлизации (1 или 2 уровня)
Блок 8 Пассивация
Блок 9 Контроль функционирования

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследования параметров микросхем при воздействии ионизирующего излучения проводили как на лазерных и рентгеновских имитационных комплексах, так и на моделирующих установках. При испытаниях на моделирующих установках и имитационных комплексах микросхемы показывали близкие уровни стойкости. Отдельные завышенные значения стойкости наблюдались при использовании лазерных имитационных комплексов, что связано, как отмечалось ранее, с экранированием излучения металлизацией.

Учитывая возможные остаточные явления, обусловленные деградацией структур при импульсных ионизирующих воздействиях, испытания на дозовую стойкость на рентгеновских комплексах выполняли после лазерных имитационных испытаний. Исследовательские испытания на лазерных комплексах проводили с оперативным контролем работоспособности в процессе воздействия, а также определяли уровень тиристорного эффекта, уровень катастрофических отказов, уровень бессбойной работы и временную потерю работоспособности. Рентгеновские имитационные испытания выполняли с оперативным контролем работоспособности в процессе воздействия, а также определением уровней параметрического и функционального отказов. В режиме считывания логических «1» и «0» проводили контроль выходных напряжений низкого и высокого уровней. Контролировались токи потребления в режиме хранения и динамический ток потребления.



Критерием работоспособности микросхем при исследовательских испытаниях была сохранность информации, т. е. совпадение записанного и считанного информационного кода. Контроль сохранности информации проводился в режиме хранения/блокировки кода «псевдослучайный», т. е. с псевдослучайным распределением информации по массиву. Применялись также коды «поле 0», «поле 1», «шахматы», «инверсные шахматы», «диагональ», «инверсная диагональ» и др. После воздействия выполнялось считывание информации из всех ячеек памяти и сравнение её с записанной до воздействия.

Максимальный достигнутый при испытаниях на лазерных комплексах уровень эквивалентной мощности дозы соответствовал требованиям к бортовой аппаратуре. При этом катастрофических отказов и тиристорного эффекта не наблюдалось. Сохранность информации определялась выходным напряжением высокого логического уровня (4 В при напряжении питания 4.5 В). Максимальное значение временной потери работоспособности не превышало 100 нс. Максимальный уровень сбоеустойчивости наблюдался в режиме хранения/блокировки. Его снижение отмечено в режиме записи/считывания, однако достигнутый уровень соответствовал требованиям к элементной базе приборов.

При испытаниях на дозовую стойкость установлено, что выходные логические уровни, время выборки и токи потребления в процессе воздействия изменяются незначительно. Значения параметров не выходили за границы установленных норм при нормальной и повышенной (85 °С) температуре окружающей среды.

Испытания микросхем на моделирующих установках показали сопоставимый уровень радиационной стойкости, соответствующий требованиям к устройствам систем управления бортовой аппаратуры.

Очевидно, что обеспечение сбоеустойчивости микросхем статических ОЗУ, выполненных по технологии с микронными проектными нормами на структурах КНС с толщиной приборного слоя 0.3 мкм, обуславливает относительно невысокую их информационную ёмкость (2-4 кбит). Десятитранзисторные с RC цепью ячейки банка памяти занимают основную площадь кристалла. Вместе с тем можно утверждать, что достигнутые стабильно высокие уровни радиационной стойкости для микросхем, изготовленных на КНС структурах, недостижимы для других технологий. Уменьшение толщины приборного слоя кремния до 0.1 мкм (так называемая технология с ультратонким кремнием) позволяет увеличить плотность элементов на кристалле. Однако дозовая стойкость микросхем при этом резко снижается. Для объяснения данного факта требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

### **Заключение**

Для обеспечения импульсной и дозовой стойкости микросхем статических ОЗУ наряду с разработкой элементов схемы и топологии важную роль играет разработка технологии изготовления. В работе рассмотрены критичные для обеспечения стойкости технологические операции маршрута изготовления. Правильно подобранные режимы проведения технологических операций позволяют значительно

увеличить процент выхода годных схем, отвечающих требованиям к элементной базе по радиационной стойкости.

С использованием результатов расчёта транспорта электронов в МОП КНС транзисторах в двумерном квазигидродинамическом приближении, с учётом действия радиации рассмотрены доминирующие в элементах схем эффекты дозовых и импульсных нагрузок. Рассчитана концентрация неподвижных положительно заряженных поверхностных состояний на границе раздела кремний–сапфир, приводящих к образованию вблизи границы проводящего канала. Установлено, что операция формирования *p*-кармана *n*-канального транзистора является одной из основных операций, определяющих импульсную и дозовую стойкость микросхем. По результатам моделирования получен оптимальный для снижения токов утечки по паразитному каналу уровень легирования кремния акцепторами. Также для снижения коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора, образование которого обусловлено ионизационными токами в подзатворной области, определён порядок легирования *p*-кармана в три стадии ионами бора и  $\text{BF}_2^+$ .

Моделирование операций технологического маршрута изготовления проводилось с использованием технологической САПР TCAD с учётом результатов анализа радиационных эффектов. Калибровку моделей выполняли с привязкой к действующему оборудованию технологической линейки. Технологические режимы выполнения операций отрабатывались на тестовых структурах с использованием лазерных и рентгеновских имитаторов с контролем

импульсных и дозовых характеристик. Разработанные стенды и методики исследований обеспечивали оценку уровней стойкости тестовых структур с полным контролем параметров в расширенном объёме электрических и температурных режимов.

Испытания микросхем на воздействие ионизирующего излучения проводили как на лазерных и рентгеновских имитационных комплексах, так и на моделирующих установках. Микросхемы показали стабильно высокий уровень стойкости к импульсным и дозовым нагрузкам, соответствующий требованиям к устройствам систем управления бортовой аппаратуры. Испытания на моделирующих установках и имитационных комплексах показали сопоставимые результаты по уровням стойкости микросхем.

Представленная в работе технология позволила освоить серийный выпуск микросхем статических ОЗУ серии 1620 с гарантированными по радиационной стойкости параметрами.

### **Литература**

1. Агаханян, Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К. Скоробогатов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. Никифоров, А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков – М.: Радио и связь, 1994. – 164 с.
3. Киргизова, А.В. Моделирование радиационной реакции элементов КМОП КНС микросхем при импульсном ионизирующем воздействии / А.В. Киргизова, П.К. Скоробогатов, А.Ю. Никифоров, Л.Н. Кессаринский, Г.Г. Давыдов, А.Г. Петров // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 1. – С. 28-44.

- 
4. A. Fernando Imaging of the silicon on sapphire interface by high-resolution electron microscopy. *Applied Physics Letters*, 1981, vol.38, iss.5, pp.439-441.
  5. Gartstein E., Lach S., Mogilyanski D. Structural silicon-on-sapphire system. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 319, iss.1-2, pp. 182-186.
  6. Оболенский, С.В. Предел применимости локальнополевого и квазигидродинамического приближения при расчётно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов / С.В. Оболенский // Известия вузов: Электроника. – 2002. – № 6. – С. 31-38.

### Referencies

1. Agakhanyan T.M., Astvatsuryan Ye.P., Skorobogatov P.K. Radiatsionnyye efekty v integral'nykh mikroskhemakh [Radiation effects in integrated circuits]. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 256 p.
2. Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Chumakov A.I., Radiatsionnyye efekty v KMOP IS [Radiation effects in CMOS IC]. Moscow, Radio i svyaz', 1994, 164 p.
3. Kirgizovz A.V., Skorobogatov P.K., Nikiforov A.Yu., Kessarinskiy L.N., Davydov G.G., Petrov A.G., Modelirovaniye radiatsionnoy reaktsii elementov KMOP KNS mikroskhem pri impul'snom ioniziruyushchem vozdeystvii [Simulation of CMOS SOS circuit's elements radiation reaction under pulsed ionizing radiation]. *Microelectronics*, 2008, vol. 37, no.1, pp. 28-44.
4. Fernando A., Imaging of the silicon on sapphire interface by high-resolution electron microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, vol. 38, pp. 439-441.
5. Gartstein E., Structural aspects of the interface in Silicon-on-sapphire system. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 319, pp. 182-186.
6. Obolenskiy S.V. Predel primenimosti lokal'nopolevogo i kvazigidrodinamicheskogo priblizheniya pri raschotno-eksperimental'noy otsenke radiatsionnoy stoykosti submikronnykh poluprovodnikovyykh priborov [Validity range of local-field and quasi-hydrodynamic approximation when providing experiment-calculated estimation of sub-micron semiconductor devices]. *Izvestiya vuzov: Elektronika*, 2002, no. 6. pp. 31-38.