

Микросборка мультиплексного канала по ГОСТ Р 52070-2003 в радиационно-стойком исполнении. Новые возможности бортового применения

Н.Ю. Миронов, В.Н. Бойнов

ЗАО НТЦ "Модуль", mironov@module.ru

Аннотация — Представлена новая микросборка мультиплексного канала (K2605ВГ1Т). Дается краткое описание ее структуры, конструктивного исполнения и основных функциональных характеристик. Проанализированы ее основные отличия от микросборки серии 2600ВГ1АТ. Дается краткое описание контроллера мультиплексного канала K1895ВА1Т - основного функционального элемента, на базе которого построена микросборка. Приведены показатели по уровню радиационной стойкости, основные принципы, используемые при проектировании и топологические особенности применяемых библиотечных элементов.

I. ВВЕДЕНИЕ

В 2009 году в рамках ОКР «Разработка базовой конструкции радиационно-стойкой микросборки мультиплексного канала по ГОСТ Р 52070» была разработана и изготовлена радиационно-стойкая микросборка мультиплексного канала. Данное изделие предназначено для построения сетей передачи данных на основе мультиплексного канала и обеспечивает работу в режимах «контроллер шины» (КШ), «оконечное устройство» (ОУ), «монитор» (МТ) в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003.

II. СТРУКТУРА МИКРОСБОРКИ И ЕЕ КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Микросборка состоит из:

- логической части на базе бескорпусной микросхемы K1895ВА1Т;
- прямо-передающей части;
- пассивных элементов согласования и преобразователей напряжения.

Приемопередающая часть микросборки K2605ВГ1Т построена на основе микросхем 5559ИН9Н2, разработки ФГУП НПО Автоматики.

В качестве основания корпуса микросборки служит толсто пленочная коммутационная плата (КП) на подложке из материала ВК 94-1 БЧ0.737.000ТУ (БЧ7.374.000-07). В качестве материала проводниковых слоев используется проводниковая серебряно-палладиевая паста марки 3723 (3723М), материала изоляционных слоев – диэлектрическая паста марки

3041. На плате в монтажном объеме устанавливаются на клей-герметик типа «Виксинит К-68» бескорпусные БИС приемопередатчика и контроллера, резистивные тонкопленочные ЧИП-фрагменты, ЧИП-резисторы и конденсаторы. Этот клей, обладая приемлемыми характеристиками по теплопроводности, позволяет обеспечить ремонт микросборки путем снятия электрорадиоизделий (ЭРИ) с толсто пленочной платы без повреждения топологии. Соединение выводов бескорпусных ЭРИ на КП осуществляется термокомпрессионной сваркой. Соединение контактных площадок ЧИП элементов производится сваркой перемычками из золотой проволоки. Такое исполнение монтажа позволило обеспечить возможность изготовления микросборки на существующем оборудовании и материалах. Крышка, рамка и внешние выводы выполняются из прецизионного легированного сплава 29НК. На крышке микросборки методом трафаретной печати краской наносится маркировка. Маркировка включает в себя обозначение индекса предприятия, наименование микросборки, ее заводской номер и дату изготовления, а также клеймо ОТК. Первый вывод выделен в виде расширения внешней контактной площадки вывода на толсто пленочной плате. В районе первого вывода на крышке наносится ключ в виде точки. Улучшение отвода тепла от элементов схемы микросборки осуществлено за счет следующих конструктивных решений:

- исключение изоляционных диэлектрических слоев под теплонагруженными элементами за счет формирования под корпусом ЭРИ проводникового «столбика», связанного непосредственно с керамической подложкой;
- исключение возможного зазора между нижней плоскостью микросборки и плоскостью печатной платы или установочной поверхностью приклейкой металлической пластины.

III. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСБОРКИ

Основные функциональные, конструктивные и эксплуатационные характеристики, в том числе статиче-

ские и динамические параметры микросборки серии K2605BG1T соответствуют параметрам микросборки предыдущего выпуска - 2600BG1AT, которая была сделана на основе микросхемы 1879BA1T. Следует отметить, что функционально-логические параметры микросборки K2605BG1T полностью задаются свойствами бескорпусной микросхемы K1895BA1T. В свою очередь, K1895BA1T вобрала в себя все функционально-логические свойства от предыдущей реализации (1879BA1T), с добавлением новых свойств.

Основным из новых свойств является возможность настройки микросхемы на так называемый расширенный режим взаимодействия с процессором (Enhanced CPU Access), в котором максимальная длительность цикла доступа к ее внутренним ресурсам (регистрам и встроенной памяти) сокращается с привычных для обычного режима 3 ... 4 мкс до 0,5 мкс.

С целью сохранения преемственности конструкция (габаритные и присоединительные размеры) микросборки K2605BG1T не отличается от конструкции микросборки 2600BG1AT. В тоже время микросборки 2600BG1AT и K2605BG1T имеют ряд существенных различий. За счет сокращения количества элементов, входящих в состав микросборки K2605BG1T, существенно улучшен тепловой режимы работы в целом. Приемопередающая часть микросборки 2600BG1AT реализована на двух типах БИС: 1470ХП1Н1 и 1470УП1Н1. Приемник сигналов с линии передачи информации (ЛПИ) и маломощная часть передатчика были выполнены на БИС 1470ХП1Н1, а выходной усилитель мощности передатчика со схемой формирования фронтов - на БИС 1470УП1Н1. Логическая часть микросборки 2600BG1AT была построена с использованием микросхемы 1879BA1T, имеющей напряжение питания 3,3 В. В микросборке K2605BG1T логическая часть выполнена на основе микросхемы K1895BA1T, имеющей напряжение питания 5,0 В. Отсутствие номинала питания 3,3 В позволило исключить из состава микросборки преобразователь напряжения и уменьшить выделяемую мощность. Приемопередающий канал построен на одной микросхеме 5559ИН9Н2, что также уменьшает количество элементов установленных в микросборке и существенно увеличивает надежность изделия в целом. Кроме того, в отличие от микросборки 2600BG1AT, вся элементная база, входящая в состав микросборки K2605BG1T, выполнена в радиационно-стойком исполнении.

IV. КОНТРОЛЛЕР МУЛЬТИПЛЕКСНОГО КАНАЛА K1895BA1T – КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

В отличие от микросхемы 1879BA1T разработка контроллера K1895BA1T производилась на основе библиотек и правил проектирования радиационно-стойкого техпроцесса.

Изначально мы нацеливались на получение изделия с повышенной радиационной стойкостью по дозовым и одиночным радиационным эффектам [1]-[3]: максимальное значение экспозиционной дозы не менее 200 крад; бесперебойное функционирование при кратковременном облучении с мощностью дозы не менее 1×10^{10} рад/сек; максимальная мощность дозы облучения не менее 1×10^{12} рад/сек; стойкость к ТЗЧ с энергией < 80 МэВ \times см²/мг; стойкость к нейтронному потоку до 1×10^{13} част/см².

Выбор кремниевой фабрики осуществлялся не только с учетом выполнения требований по достижимым уровням стойкости. Он определялся еще и достаточно жесткими временными рамками выполнения ОКР. Поэтому мы были вынуждены предъявлять особые требования к предоставляемым фабриками библиотекам. Нам были необходимы:

- либо готовое ОЗУ в виде настраиваемой параметрами высокоуровневой библиотечной функции;
- либо полностью отлаженный «процесс проектирования» топологии функциональных блоков на библиотечных элементах транзисторного уровня.

То есть, в отсутствие ОЗУ нам нужна была библиотека транзисторного уровня, которая кроме «объявления» специфицированных правил проектирования и конструктивно-топологических требований (КТТ), сопровождается средствами автоматического контроля надлежащего выполнения этих правил и норм, а также средствами автоматической модификации, подстройки топологии компонентов, согласно их параметрам, с соблюдением КТТ. В отсутствие подобного «отлаженного инструмента проектирования» даже искушенному специалисту сегодня было бы трудно решиться на разработку топологии такого сложного функционального блока как, например, ОЗУ.

В итоге, выбор был остановлен на 0,5 мкм КМОП технологии SCMOS3RT французской фирмы MHS Electronics. Нам были предоставлены все необходимые сведения касательно правил проектирования, электрических и топологических ограничений, предложены различные варианты маршрутов проектирования. Также были предоставлены параметры технологии с учетом их изменения при стационарном облучении, и объяснены особенности топологии элементов библиотеки транзисторного уровня, отвечающие за повышенную «стойкость» технологии.

V. КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИБОРОВ SCMOS3RT ТЕХНОЛОГИИ

Тестируемыми приборами были NMOS и PMOS транзисторы с различной геометрией (W/L = 1,2/10; 10/0,5), NFOX полевые транзисторы с каналом n-типа с различными затворами (поликристалл/металл) и инверторы, построенные по минимальному уровню КТТ.

Рабочие условия для проведения эксперимента:

- для NMOS и NFOX транзисторов: $U_z = U_{пит}$, $U_c = U_i = 0$ В;
- для PMOS транзисторов: $U_z = 0$ В; $U_c = U_i = U_{пит}$.

Эти условия были выбраны как наиболее критичные из существующих условий. В эксперименте применялся источник ^{60}Co , который позволял достичь экспозиционной дозы в 300 крад в течение 17 часов.

Приборы облучались с различными темпами: низким – 0,65 крад/час, и высоким, который менялся в диапазоне от 2,9 до 17,6 крад/час. После достижения максимальной экспозиционной дозы, тестируемые приборы выдерживались в течение суток при комнатной температуре без напряжений смещения на затворах, затем смещения на затворы возвращались и производился отжиг: в течении 168 часов приборы выдерживались при температуре + 100 °С.

Отдельные результаты исследований, для низких темпов накопления дозы, сведены в нижеследующих таблицах и графиках.

Таблица 1.

Токи утечки $I_{ут}$ ($U_c = 5,5$ В; $U_z = 0$ В)

Прибор	Старт	100к	350к	24h, 25 °C	168h, 100 °C
NMOS 1,2/10	2.2e-11	2.2e-11	3.0e-11	3.4e-11	2.0e-11
NMOS 10/0,5	3.1e-11	3.3e-11	5.8e-11	6.5e-11	3.7e-11
NFOX Poly	3.0e-11	3.6e-11	4.7e-11	4.6e-11	3.3e-11
NFOX Metal	1.9e-11	1.9e-11	2.1e-11	2.1e-11	1.8e-11
Inverter ON	2.4e-11	2.8e-11	6.7e-11	6.6e-11	2.8e-11
Inverter OFF	2.1e-11	3.3e-11	5.9e-11	5.4e-11	2.0e-11

Таблица 2.

Сдвиг напряжения порога после 100к и 300к + восстановление (168h, +100 °C)

Прибор	100к	300к + 168h, 100°C
NMOS 10/0,5	- 18 мВ	- 35 мВ
PMOS 10/0,5	+ 27 мВ	+ 82 мВ

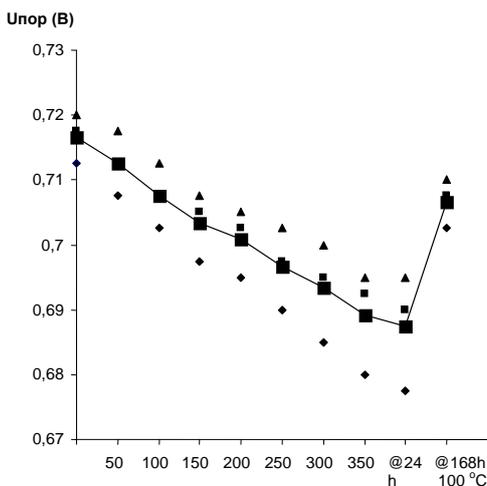


Рис. 1. Пороговое напряжение, транзистор NMOS W/L 10/0,5. Смещение в течение облучения: $U_{пит} = 5$ В

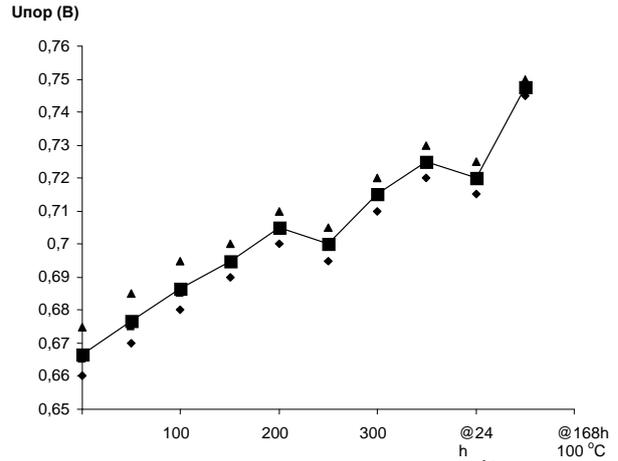


Рис. 2. Пороговое напряжение, транзистор PMOS W/L 10/0,5. Смещение в течение облучения: $U_{пит} = 5$ В

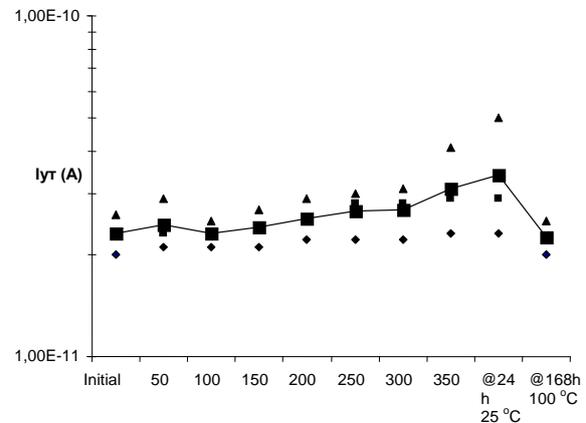


Рис. 3. Ток утечки, транзистор NMOS W/L 1,2/10. Смещение в течение облучения: $U_c = 5,5$ В; $U_z = 0$ В

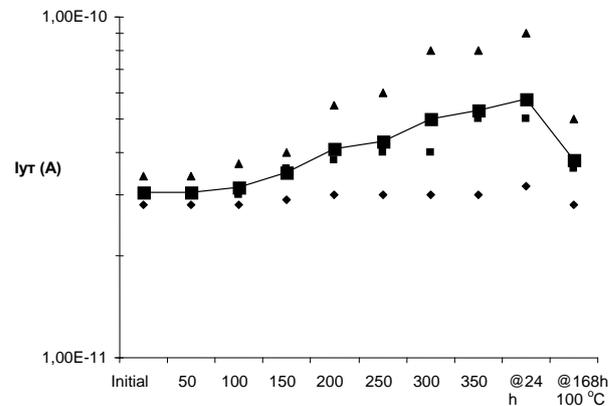


Рис. 4. Ток утечки, транзистор NMOS W/L 10/0,5. Смещение в течение облучения: $U_c = 5,5$ В; $U_z = 0$ В

Анализ электрических параметров технологии SCMOS3RT с учетом их изменения при стационарном облучении, а также правил проектирования и особенностей топологии элементов библиотеки транзисторного уровня позволил сделать ряд выводов, влияющих на выбор схмотехнических и конструктивно-топологических решений.

1. В конструкции приборных транзисторов n-типа предприняты достаточные технологические меры

N+ PROTECT (n-охрана) [6] для предотвращения внутритранзисторных утечек при стационарном облучении.

2. Рекомендованная к использованию FIRST P+ (p+ охрана) [6] вдоль границы n-кармана и n+ областями стоков/истоков транзисторов n-типа в p подложке позволяет решить две задачи:

- устранить утечку между n карманом и n+ областями в подложке при стационарном облучении;
- сделать конструкцию не чувствительную к эффекту «защелкивания» (Latchup immune) как при воздействии фактора 7.И (характеристика 7.И6), так и при воздействии тяжелых частиц (ГЧ) до $SEL > 80 \text{ МэВ} \times \text{см}^2/\text{мг}$.

3. Отсутствие p+ охраны между областями n+ в подложке может приводить к возникновению между ними утечки при дозах более 300 крад.

4. Изменение пороговых напряжений приборных транзисторов в худшем случае (активный режим на затворе $\pm 5 \text{ В}$) не превышает у транзистора n-типа – 40 мВ, у транзистора p-типа – 50 мВ при мощности дозы 0,8 ... 4,9 рад/сек.

5. Учитывая быстрый «отжиг изменения» порогового напряжения у транзистора n-типа после облучения до дозы 300 крад мощностью 0,8 ... 4,9 рад/сек, его изменение при облучении до той же дозы меньшими мощностями будут меньше.

6. Величины внутритранзисторных утечек приборных транзисторов как n-типа, так и p-типа при облучении в наилучшем активном режиме до 300 крад незначительны и пренебрежимо малы.

Таким образом, в итоге мы пришли к выводу, что базовая технологии 0,5 мкм 300К (SCMOS3RT) может быть принята для разработки микросхемы K1895BA1T, и позволяет с использованием методов радиационно-стойкого проектирования [4] достигнуть требуемых параметров стойкости, повысив уровни функциональных и параметрических отказов, а также сделать контроллер нечувствительным к эффекту «защелкивания» (Latchup immune) [2].

VI. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

В процессе разработки микросхемы K1895BA1T были проведены:

- анализ правил проектирования топологии по технологии SCMOS3RT;
- анализ динамических свойств цифровой библиотеки компонентов SCMOS3RT;
- отладка средства электрического моделирования и верификации топологии на DRC и LVS с использованием соответствующих файлов для базовой технологии;
- сравнение различных схмотехнических и топологических решений элементов памяти (ЭП) и определение компромиссных решений.

Были созданы и разработаны:

- конструктивно-топологические решения базовых элементов СФ-блока ОЗУ, в том числе несколько различных вариантов решений для элемента памяти;
- конструктивно-топологические решения СФ-блока ОЗУ 4Kx16, протокольных и периферийных блоков контроллера, кристалла K1895BA1T в целом.

Особое внимание было уделено разработке встроенной памяти, как наиболее чувствительному, с точки зрения воздействия радиации, элементу микросхемы. Однако перед тем как приступить к проектированию СФ-блока ОЗУ, необходимо было определить основные критерии и выработать требования, согласно которым он должен разрабатываться. Больше всего вызвали сомнения динамические и габаритные характеристики ОЗУ: каковы их предельные и оптимальные значения? Из проведенного анализа топологии транзисторного уровня было очевидно, что повсеместное использование p+ охраны и увеличенных по размерам n-канальных (с n-охраной) МОП транзисторов неизбежно приведет к увеличению занимаемой проектом площади, а вместе с тем – к ухудшению быстродействия. Фактически, предпринятыми «защитными» мерами технология 0,5 мкм SCMOS3RT по показателям занимаемых площадей и быстродействию была переведена на пониженный уровень топологических норм. Кроме того, нам предстояло оценить способность библиотеки SCMOS3RT предоставлять возможность построения на своих компонентах приемлемых по динамике работы и занимаемому объему «*списков цепей*» (нетлисты), и оптимально упаковывать их в кристалл.

Для оценки требуемых динамических и пространственных параметров встроенной памяти в качестве топологического представления СФ-блока ОЗУ был создан «*черный ящик*», начинкой которого была «*высокоуровневая Verilog модель*» с регулируемым быстродействием. Были написаны алгоритмические сценарии («*скрипты*») для построения «*нетлистов*» и топологии из стандартных компонентов библиотеки SCMOS3RT, впрочем, модификация «*скриптов*» продолжалась вплоть до завершающего этапа проектирования кристалла. Последовательно просканировав значения размеров и основных динамических параметров «*черного ящика*» ОЗУ в выбранных диапазонах, было выполнено множество проектов топологии контроллера. После проведения анализа полученных результатов были определены требуемые и предельные быстродействие и габаритные размеры для топологического решения СФ-блока ОЗУ. В процессе проведенных исследований было установлено, что максимальная рабочая частота СФ-блока ОЗУ для наилучших условий должна быть не менее 40 МГц, а площадь не должна превышать 10 мм². При таких параметрах СФ-блока ОЗУ удавалось получить контроллер, работающий на частоте 16 МГц (период 62,5

нс) с предварительной установкой входных сигналов не менее чем за 10 нс до поступления нарастающего перепада тактового синхросигнала и установлением выходных сигналов в ожидаемые состояния не позднее 45 нс после нарастающего перепада тактового синхросигнала. Стало очевидно, что для случая нашей функциональной логики (ее сложности и объема) запасом по быстродействию технология 0,5 мкм SCMOS3RT не обладает. По ходу изучения динамических свойств SCMOS3RT были также определены оптимальные пространственные и взаимные расположения основных структурных блоков контроллера, в том числе и СФ-блока ОЗУ, и найдено оптимальное расположения выводов («падов») для внешних сигналов в кристалле. Сделана оценка оптимальной величины общей площади контроллера с внутренней памятью: выяснилось, она не должна быть много меньше, чем 36 мм². Основные требования к встроенной памяти были сформулированы, и можно было приступить к разработке СФ-блока ОЗУ.

Было спроектировано несколько вариантов топологии шеститранзисторных КМОП элементов памяти (6Т). Рассматривались элементы памяти как с n-канальными управляющими транзисторами, так и с p-канальными. В итоге СФ-блок был выполнен на основе классической 6-транзисторной ячейки с n-канальными транзисторами связи (рис. 5) с использованием всех трех уровней металлизации.

(а)

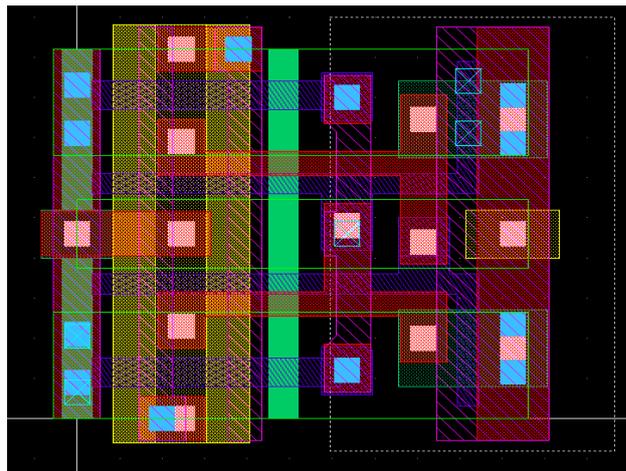
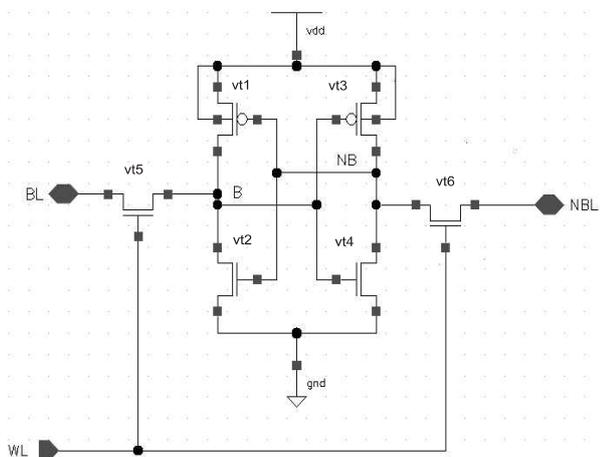


Рис. 5. Ячейка памяти: схема электрическая (а) и топология (б)

Как показал анализ различных конструктивно-схематических вариантов ячеек памяти, включая ячейки с p-канальными транзисторами связи (транзисторы Т5, Т6), выбранный вариант является наилучшим по совокупности различных параметров, в том числе и по быстродействию и занимаемой площади. Размеры транзисторов во всех элементах выбирались из условия обеспечения надежного чтения и записи информации в ЭП в соответствии с методикой, описанной в [5].

Размеры ячейки составляют: $X = 10,25$ мкм, $Y = 9,2$ мкм и площадь 94,3 мкм². Соответственно площадь накопителя равна $S_n = 6,18$ мм², что составляет 83 % от всей площади СФ-блока, равной 7,44 мм². СФ-блок ОЗУ имеет 2-х блочную архитектуру, позволяющую существенно уменьшить динамическую потребляемую мощность по сравнению с одноблочной организацией накопителя, так как к внутренним разрядным шинам подключены всего 128 ячеек, что существенно меньше по сравнению с 256 ... 512 при одноблочной организации. В сочетании с повышенным значением тока считывания выбранной ячейки это обеспечивает достаточно высокое значение скорости нарастания считываемого сигнала на разрядных шинах, чтобы обеспечить высокое быстродействие ОЗУ без использования высокочувствительных усилителей считывания, которые являются наиболее чувствительными к облучению элементами. Структурная схема СФ-блока приведена на рис. 6.

(б)

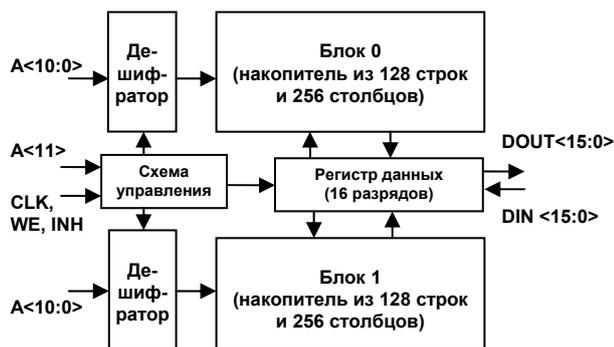


Рис. 6. Структурная схема СФ-блока

Каждый блок накопителя имеет организацию 128×256 , т.е. имеет 128 строк и 256 столбцов. Выбор конкретного блока осуществляется с помощью старшего адреса A11: при A11 = 0 выбирается первый блок (блок 0), а при A11 = 1 – второй (блок 1). Все столбцы, относящиеся к одному разряду, на топологии расположены рядом, что позволяет уменьшить емкость внешних разрядных шин. Поскольку разрядность каждого блока составляет 16, то каждому разряду соответствует 16 столбцов накопителя.

Выходные регистры располагаются между блоками накопителя, что позволяет минимизировать длину связей между регистрами и внешними разрядными шинами обоих блоков. При этом на топологии, также как и на структурной схеме, «пины» данных DIN<15:0> и DOUT<15:0> выведены с правой стороны СФ-блока, а остальные (A<11:0>, CLK, WE, INH) – с левой стороны.

При формировании топологии СФ-блока задействованы все три уровня металлизации с соблюдением норм по плотности металлизации (не менее 30 %).

VII. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ БОРТОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Появление новой микросборки K2605BG1T в радиационно-стойком исполнении значительно расширяет возможности по ее применению в таких сферах как авиация и космос. Максимальный уровень стойкости микросборки K2605BG1T в первую очередь определяется стойкостью бескорпусной микросхемы K1895BA1T. Чтобы можно было оценить, насколько улучшились показатели по стойкости к дозовым и одиночным радиационным эффектам, отдельные сведения по стойкости к воздействию спецфакторов, полученные в результате проведения испытаний микросхем 1879BA1T и K1895BA1T, были сведены в нижеследующую таблицу.

Таблица 3.

Стойкость к воздействию специальных факторов		
Характеристика излучения	1879BA1T	K1895BA1T
7.И6	2×5Ус	Превышает 6Ус
7.И7	0,5×2Ус	Превышает 6×4Ус
7.К1	1К	2К
7.К4	0,05×1К	1К
7.И12		2Р
7.И13		1Р

Испытания показали - в результате проведенных работ удалось создать конструкцию микросборки K2605BG1T не чувствительную к тиристорному эффекту (ТЭ) как при воздействии фактора с характеристикой 7.И6, так и при воздействии отдельных протонов естественных радиационных поясов земли, галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). Значения пороговых линейной потери энергии для возникновения ТЭ и одиночных сбоев (ОС) в микросборках K2605BG1T при воздействии тяжелых заряженных частиц ГКЛ и СКЛ:

ЛТЭ > 40 МэВ×см²/мг, ЛОС > 40 МэВ×см²/мг.

Достигнутый уровень радиационной стойкости по интегральному потоку протонов (1×10^{12} част/см²) отвечает требованиям многих космических аппаратов.

Литература

- [1] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. - М.: Радио и связь. - 1994. - 164 с.
- [2] Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. - М.: Радио и связь. - 2004. - 320 с.
- [3] Телец В., Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений: архитектура и схемотехнические особенности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. - 2005. - № 6. - С. 44 - 48.
- [4] Герасимов Ю.М., Григорьев Н.Г., Солохина Т.В. Радиационно-стойкое проектирование субмикронных КМОП СБИС // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов / Под ред. В.Я. Стенина. - М.: МИФИ. - 2007. - С. 32-37.
- [5] Баринов В.В., Березин А.С., Вернер В.Д., Герасимов Ю.М. и др. Сверхбольшие интегральные микросхемы оперативных запоминающих устройств // Под ред. В.Д. Вернера. - М.: Радио и связь. - 1991. - 272 с.
- [6] MHS Electronics. SCMOS3RT_DK Topological Design Rules. Version C.