

Технология R25 против радиации: новые продукты на российском рынке электроники для космических аппаратов

Александр ПОПОВИЧ
popovich@bae-rh.ru

О компании BAЕ Systems

До недавнего времени продукция одной из крупнейших в мире международных военно-промышленных корпораций BAЕ Systems в Российскую Федерацию официально не поставлялась. Однако времена меняются, и сегодня мы представляем весь широкий ассортимент радиационно-стойких микросхем, выпускаемых на заводах BAЕ.

ЗАО «БА Электроникс» (BA Electronics) эксклюзивно уполномочено импортировать и распространять на условиях ИТАР радиационно-стойкие электронные компоненты, выпускаемые корпорацией BAЕ Systems (www.baesystems.com), обеспечивать выполнение гарантийных обязательств и техническую поддержку всех потребителей на территории России, а также республик, ранее входивших в состав СССР. Британская компания BAЕ Systems (до 1999 г. — British Aerospace) специализируется на создании вооружения и военной техники, в том числе боевых самолетов и подводных лодок. Сегодня она занимает второе место в мире по объему продаж оружия, уступая лишь американской корпорации Boeing. BAЕ самостоятельно разраба-

тывает и производит полупроводниковую элементную базу, как для собственных нужд, так и для продажи. Центр полупроводниковых технологий BAЕ, расположенный в США, выпускает все электронные компоненты, которые необходимы для создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, и на протяжении многих лет является мировым лидером в области радиационно-стойких полупроводниковых нанотехнологий.

Рассказать обо всех изделиях BAЕ, даже коротко, в рамках одной статьи невозможно, поэтому ограничимся обзором технологии радиационно-стойких КМОП-микросхем с технологической нормой 0,25 мкм и основных семейств микросхем, которые теперь доступны для всех отечественных предприятий космического приборостроения.

Технология R25

Процесс изготовления больших интегральных КМОП-микросхем повышенной радиационной стойкости с технологической нормой 0,25 мкм используется BAЕ для создания микросхем различного функционального

назначения. Данный процесс, реализованный на заводе в Манассасе (штат Вирджиния), носит название «Технология R25». Все полупроводниковые изделия, выполненные по технологии R25, включая оперативную и энергонезависимую память, обеспечивают:

- работоспособность при накопленной дозе не менее 200 крад;
- бесперебойное функционирование при кратковременном облучении 2×10^7 рад/с;
- сохранение работоспособности после 50 нс импульсного облучения 1×10^{12} рад/с;
- стойкость к тяжело заряженным ионам (ТЗЧ) с энергией < 120 МэВ·см²/мг;
- стойкость к нейтронному потоку до 1×10^{13} нейтрино/см².

Отдельные семейства микросхем обеспечивают уверенное функционирование при накопленной дозе до 1 Мрад. Выдающиеся характеристики по радиационной стойкости позволяют применять микросхемы, выполненные по технологии R25, в самых ответственных космических миссиях.

Основные семейства микросхем, выполненных по технологии R25, представлены на рис. 1.

Для разработки бортовой цифровой аппаратуры, вычислительных и управляющих модулей предназначен 32-разрядный микропроцессорный комплект RAD750, включающий в себя быстродействующий микропроцессор с архитектурой PowerPC, а также набор вспомогательных чипов, позволяющих эффективно соединить процессор с наиболее распространенными узлами современной цифровой аппаратуры на борту космического аппарата.

В частности, это мост PCI 2.2, многоканальный интерфейс SpaceWire, контроллер памяти, а также многое другое. Без запоминающих устройств не обходится ни один современный прибор, поэтому BAЕ выпускает широкий ассортимент микросхем памяти, работающих с различными напряжениями питания. Это статическая оперативная память, однократно программируемая память по технологии antifuse, специализированные высокоскоростные (7,5 нс) микросхемы кэш-памяти L2 с 72-разрядной шиной

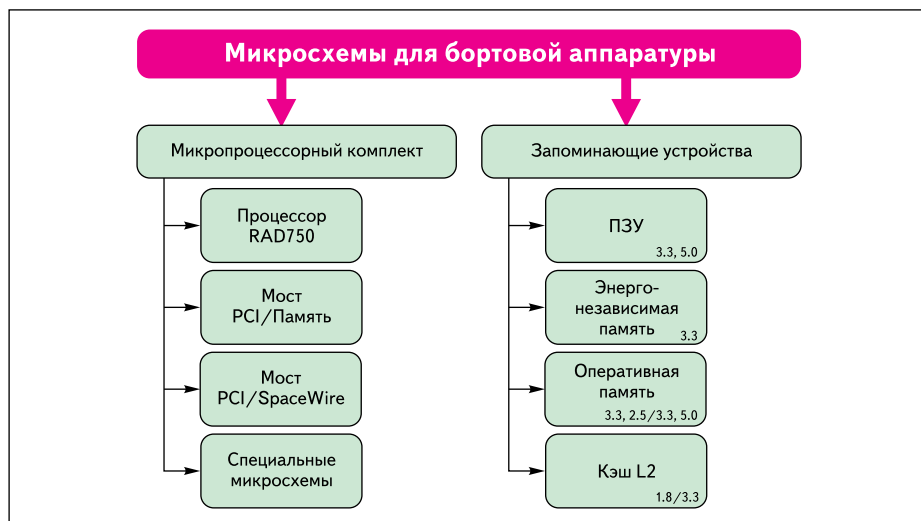


Рис. 1. Основные семейства микросхем, выполненных по технологии R25

данных, а также уникальная энергонезависимая память, построенная из наноэлементов с изменяемым фазовым состоянием, о которых будет рассказано чуть позже.

Процессор RAD750

Мощный 32-разрядный процессор RAD750 представляет собой радиационно-стойкий аналог процессора IBM PowerPC 750 и может быть использован как ядро вычислительно-управляющей системы космического аппарата. Технология R25 при рабочем напряжении 3,3 В позволяет достичь тактовой частоты процессора до 132 МГц. Суперскалярная архитектура PowerPC, система команд RISC, встроенный сопроцессор для вычислений с плавающей точкой (IEEE 754), два встроенных модуля кэш-памяти по 32 кбайт для данных и инструкций, а также интерфейс кэша L2 позволяют достичь высокой производительности, ранее недоступной для вычислителей, функционирующих в условиях повышенной радиации.

Процессор сохраняет работоспособность в диапазоне температур $-55...+125$ °С при накопленной дозе до 200 крад и облучении нейтронным потоком 1×10^{12} нейтрино/см² с частотой отказов $1,6 \times 10^{-10}$ на бит в сутки. Потребляемая мощность составляет от 400 мВт в спящем режиме и до 5 Вт в режиме максимальной активности. Микросхема выпускается в керамическом корпусе column grid array CCGA-360, изображенном на рис. 2.

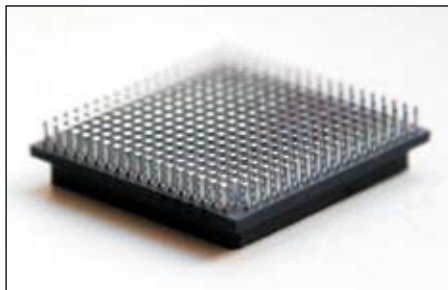


Рис. 2. Внешний вид корпуса CCGA

Для реализации эффективных вычислительных систем в состав чипсета RAD750 также входят:

- контроллер Power PCI 2.2 33 МГц с дополнительными служебными функциями (таймеры, контроллер прерываний, формирователь тактовой частоты и многое другое);
- скоростной кэш L2 (128×72);
- двухканальный контроллер PCI 2.0, совмещенный с 4 каналами SpaceWire (ECSS-E-50-12 A) 260 МГц и встроенным интеллектуальным роутером на основе специализированного программируемого микроконтроллера.

Встроенный в мост PCI/SpaceWire программируемый микроконтроллер позволяет гибко конфигурировать роутер SpaceWire для решения различных сетевых задач. Все каналы

SpaceWire оснащены встроенными LVDS-приемопередатчиками и защищены от пробоя статическим электричеством, что дает возможность подключать микросхему непосредственно к сети. Дополнительная функция «подсматривания» за линиями SpaceWire позволяет, не вторгаясь в работу сети, исследовать потоки данных с целью отладки программного обеспечения. Максимальное энергопотребление «изделия 8396844» не превышает 1,5 Вт.

Оперативная память SRAM

В настоящий момент для российских потребителей доступны три семейства микросхем оперативной памяти: Magnum, Millenium и «продукция особого назначения» серии 190. Все изделия, процедуры тестирования и технологии производства соответствуют самым жестким требованиям стандартов MIL-PRF-38535 и MIL-STD-883.

Magnum — это устаревшее семейство микросхем радиационно-стойкой асинхронной оперативной памяти. Выполненная по технологии R25 (3,3 В) микросхема памяти обеспечивает стабильное функционирование при накопленной дозе до 500 крад и облучении нейтронным потоком 2×10^{13} нейтрино/см² с частотой отказов 1×10^{-9} на бит в сутки. Скорость чтения и записи данных составляет 25 нс. Доступные типы корпусов: flatpack-36 и flatpack-40.

Millenium — это новое семейство высокоскоростных микросхем радиационно-стойкой асинхронной оперативной памяти. Время чтения и записи данных — всего 15 нс. Выполненная по технологии R25 (2,5 В) микросхема памяти, представляющая собой от одного до 5 кристаллов, установленных в одном корпусе, может быть использована в любых современных электронных системах на борту космического аппарата и обеспечивает высокий уровень надежности в условиях повышенной радиации и расширенном диапазоне температур ($-55...+140$ °С).

Для изделий семейства, в зависимости от модификации, обеспечивается стойкость по накопленной дозе 100 или 200 крад, стойкость к ТЗЧ с энергией < 120 МэВ·см²/мг и нейтронному потоку до 1×10^{13} нейтрино/см². Ожидаемая частота отказов при этом составляет не более 1×10^{-9} на бит в сутки.

Доступные варианты микросхем SRAM приведены в таблице.

Серия 190 предназначена для космических аппаратов, в которых требования по радиационной стойкости особо высоки. Изделия семейства 190A325 обеспечивают стабильное функционирование при накопленной дозе до 1 Мрад и облучении нейтронным потоком 1×10^{14} нейтрино/см² с частотой отказов 1×10^{-11} на бит в сутки. Скорость чтения и записи данных составляет не хуже 25 нс при рабочем напряжении питания 5 В. Доступные типы корпусов: flatpack-32 и flatpack-40.

Таблица. Доступные варианты микросхем SRAM

Объем и конфигурация, байт	Тип корпуса
512×8	flatpack-36
512×8	flatpack-40
512×32	flatpack-84, flatpack-86
512×40	flatpack-84
1024×8	flatpack-84
2048×8	flatpack-84, flatpack-100
4096×8	flatpack-100
8192×8	flatpack-100
2048×16	flatpack-100
4096×16	flatpack-100
2048×32	flatpack-100
2048×40	flatpack-100

Энергонезависимая память C-RAM

С 60-х годов прошлого века года проводились исследования возможности применения материалов с изменяемой фазой агрегатного состояния вещества для хранения информации. Применение лазеров для записи и считывания информации на CD и DVD давно уже стало обыденным, однако практическая реализация патента 1969 года об электрической модификации данных, закодированных фазой в сверхмалом объеме вещества, потребовала десятилетий усиленных исследований. Современная технология создания микросхем памяти на основе эффекта изменения фазы была разработана компанией Ovonyx в рамках сотрудничества с Lockheed Martin Aerospace Electronic Systems (с 2000 года — часть корпорации BAE Systems). Сегодня BAE является мировым лидером в области разработки и производства микросхем энергонезависимой памяти с «халькогенидными» запоминающими элементами на основе сплавов Ge-Sb-Te. Принцип действия ячейки памяти схематично изображен на рис. 3 (рисунок из Wikipedia, публикуется на правах GNU Free Documentation License).

Электрическое сопротивление наноэлемента из сплава Ge-Sb-Te существенно отличается, в зависимости от того, в аморфном состоянии находится сплав или в кристаллическом. Переход между фазами осуществляется под воздействием импульсов тока длительностью не более 1000 нс. Очевидно, фазовое состояние вещества мало зависит от накопленной дозы радиации и потоков тяжелых частиц. Поэтому, в отличие от элементов Flash, подобные элементы способны надежно хранить информацию неограниченно долгое время. Исследования показали, что самопроизвольное изменение данных в халькогенидной памяти в диапазоне температур работы полупроводниковых КМОП-структур крайне маловероятно, что позволяет производителю гарантировать срок хранения информации, достаточный практической для любых космических миссий.

C-RAM — это наиболее совершенная энергонезависимая память из доступных на рынке, выпускаемая BAE. Выполненная по технологии R25 3,3 В микросхема памяти с хал-

когенидными запоминающими элементами обладает стойкостью к факторам космического пространства, достаточной для применения в самых ответственных миссиях.

В настоящий момент доступны конфигурации 512×8 NVRAM (требуется внешняя схема ECC) и 256×8 NVRAM (со встроенной схемой коррекции ошибок) в керамическом корпусе flatpack-40, а также модульные конфигурации до 512×32 NVRAM в корпусе flatpack-84. Микросхема гарантирует до 100 000 циклов перезаписи и срок хранения данных 50 лет (при температуре до +70 °С и наличии схемы коррекции ошибок). Полностью асинхронный цикл чтения составляет 100 нс, а цикл записи — 1000 нс.

Микросхемы C-RAM могут применяться в диапазоне температур -40...+110 °С и обеспечивают радиационную стойкость по накопленной дозе не менее 200 крад, бесперебойное функционирование при кратковременном облучении 2×10^7 рад/с, а также сохранение работоспособности после 50 нс импульсного облучения 1×10^{12} рад/с.

Готовое решение

Располагая описанным выше набором микросхем, несложно создать полетный компьютер или интеллектуальный прибор, соответствующий современным требованиям и тенденциям космического приборостроения. В случае если времени на разработку собственного решения недостаточно, существует возможность приобрести один из гото-

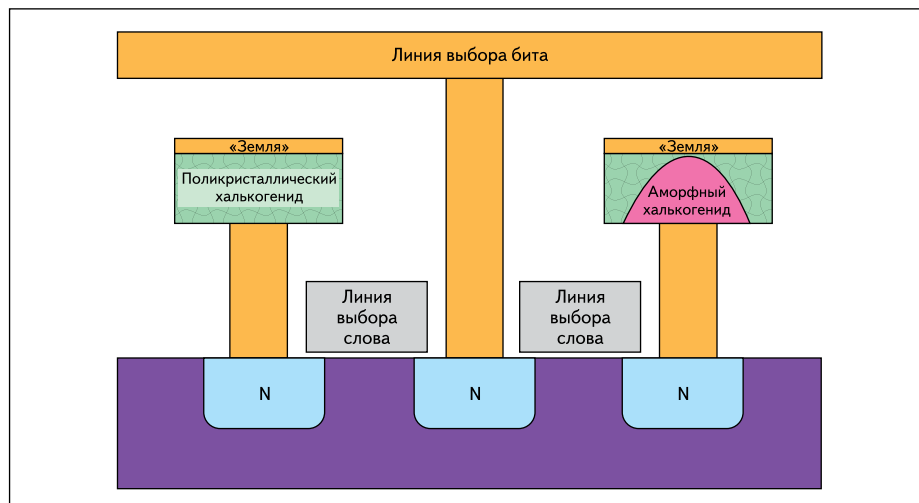


Рис. 3. Принцип действия ячейки памяти

вых процессорных блоков, выпускаемых серийно BAE Systems.

Так, например, доступен готовый одноплатный полетный компьютер RAD750 в формате CompactPCI 3U, который успешно применялся в экспедиции на Марс. Данное изделие имеет следующие характеристики:

- вес — 549 г;
- тактовая частота процессора — 132 МГц (производительность 260 Dhrystone 2,1 MIPS);
- энергопотребление — 10,2 Вт (3,3 В);
- объем памяти — до 128 Мбайт SDRAM, до 256 кбайт ROM;

- интерфейс PCI 2.2;
 - радиационная стойкость по накопленной дозе — 100 крад;
 - ожидаемый поток отказов компьютера на геостационарной орбите: не хуже $1.9E-4$ отказов в сутки;
 - рабочий диапазон температур -55...+70 °С.
- В формате 6U также выпускается полетный компьютер весом 1220 г, с объемом памяти до 48 Мбайт SRAM и до 4 Мбайт NVRAM и энергопотреблением не более 14 Вт (3,3 В).

Дополнительную информацию об электронных компонентах BAE, доступных в России, можно найти на сайте www.bae-rh.ru. ■