

# Радиационно-стойкие микросхемы компании Atmel

Юрий Петропавловский (Ростовская обл.)

В статье рассмотрены особенности микросхем для космических, военных и специальных применений компании Atmel. Приведены параметры радиационно-стойких ИС микропроцессоров, ПЛИС и памяти.

Компания Atmel (Сан-Хосе, Калифорния, США) является ведущим мировым производителем микропроцессоров, энергонезависимой памяти, микросхем частного применения, современных логических устройств, различных датчиков и других изделий. В последние годы фирма существенно увеличила производство микропроцессоров (на 25% в 2011 г.).

Кроме ИС широкого применения, компания выпускает изделия космического, специального и военного назначения. В каталог 2012 г. вошли специализированные микросхемы (ASIC) для авионики и военной промышленности, радиационно-стойкие микросхемы для телекоммуникаций, памяти, FPGA и микропроцессоры.

Компания сертифицирована по стандартам MIL-PRF-38535, ESCC 9000, DSCC QML уровни Q (Military), V (космос), ESCC 2549000 (ESCC QML) и ряду других. Центр снабжения министерства обороны США (DSCC, Defense Supply Center Columbus) проводит регулярный аудит продукции компании военного назначения. Кроме того, компания квалифицирована Европейским космическим агентством (ESA), национальным центром космических исследований Франции (CNES) и NASA.

Потребителями продукции Atmel являются многие известные компании и агентства, в том числе Lockheed-Martin, Northrop Grumman, Raytheon, EADS

(European Aeronautic Defens and Space Company), Boeing и др.

К изделиям военного и специального назначения предъявляются особые требования по надёжности при эксплуатации в особо жёстких условиях внешней среды и радиационной стойкости. На электронную аппаратуру, находящуюся на больших высотах и в космосе, воздействуют электроны, протоны, другие космические частицы, рентгеновское и гамма-излучение. При их взаимодействии с КМОП-структурами микросхем ионизируются затворы транзисторов и подзатворный окисел, в полупроводниковых структурах появляются различные дефекты. В результате возникает паразитный проводящий слой, и изменяются некоторые параметры транзисторов, в частности, пороговые напряжения, токи утечки, динамические характеристики и др. Степень деградации облучённых структур зависит от суммарной дозы полученной радиации и интенсивности облучения.

При больших дозах радиации могут происходить случайные переключения (SET, Single Event Transient) и защёлкивания (Latch-up) транзисторов. Наиболее часто различные отказы космических систем возникают из-за случайных воздействий космических частиц (SEE, Single Event Effect). Наиболее распространённый, но наименее опасный тип – одиночный сбой (SEU, Single

Event Upset) – может вызывать изменения состояний триггеров и ячеек памяти. При обнаружении одиночного сбоя можно перезаписать или восстановить правильное состояние схемы сигналом перезагрузки. Одним из самых опасных событий является защёлкивание транзисторов (SEL, Single Effect Latchup) [1].

Существуют различные методы повышения радиационной стойкости микросхем. Одним из распространённых способов борьбы с одиночными сбоями и накоплением индуцированного излучением заряда является технология «кремний на диэлектрике» (SOI) [2]. Для повышения надёжности КМОП-микросхем применяют различные подходы на уровне библиотек элементов и при проектировании устройств. К ним относятся увеличение длины затворов транзисторов и уровней сигналов переключения, использование метода тройного резервирования (TMR, Triple Modular Redundancy), основанного на создании дубликатов критических узлов схем (см. рис. 1). В ячейках памяти часто применяют двойные защёлки (DICE, Dual Inter-locked Storage, см. рис. 2) с четырёхузловой структурой избыточности, что гарантирует защиту от одиночных сбоев при воздействии космических частиц только на один узел системы.

Большинство ИС типа FPGA построены на базе статического ОЗУ, основная часть которого приходится на схемы конфигурирования. В случае возникновения одиночного сбоя могут измениться значения в списке логических элементов, что приведёт к неправильному функционированию устройства. Радиационно-стойкие FPGA обычно оснащают функцией периодической проверки набора элементов реконфигурирования по отношению к сохранённым по умолчанию состояниям [3]. Более надёжными считаются FPGA с соединениями на антиперемычках, которые подвержены воздействию радиации.

Для повышения эффективности противодействия одиночным сбоям некоторые триггеры микросхем осна-

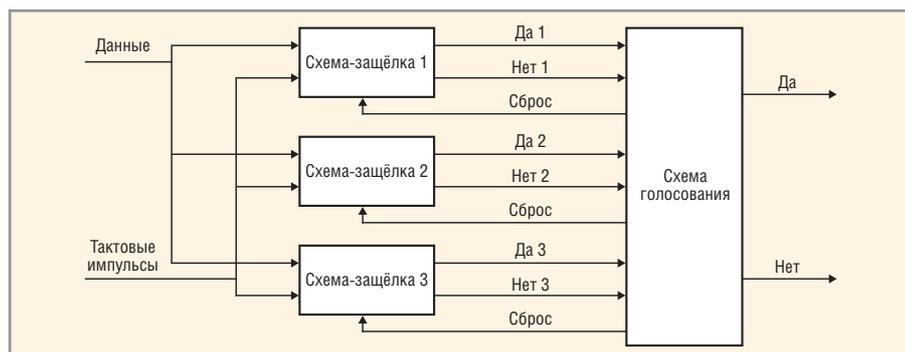


Рис. 1. Метод тройного резервирования

щают устройствами задержки, которые удерживают логику от переключения в течение времени, достаточного для рекомбинации генерированных ионами зарядов (при этом снижается быстродействие микросхем). Другой метод состоит в сохранении состояний узлов (Temporal Sampling) с периодом большим, чем длительность импульса тока, вызванного радиацией. Обычно его применяют в дополнение к тройному резервированию. Такая временная фильтрация защищает и от случайного переключения. Применяются также проверка чётности и корректирующие коды (ECC).

Фирма Atmel предлагает для космических приложений ИС типа «море транзисторов» (Sea of Gates). Также компания выпускает ASIC на базе библиотечных элементов ATC18RHA, выдерживающие дозу радиации до 300 крад, и радиационно-стойкие 32-разрядные SPARC-процессоры, предназначенные для бортовых компьютеров космических аппаратов. Для предотвращения неисправностей, вызванных SEU и SET, процессоры оснащены TMR и устройствами обнаружения и исправления ошибок (EDAC, Error Detection and Cor-

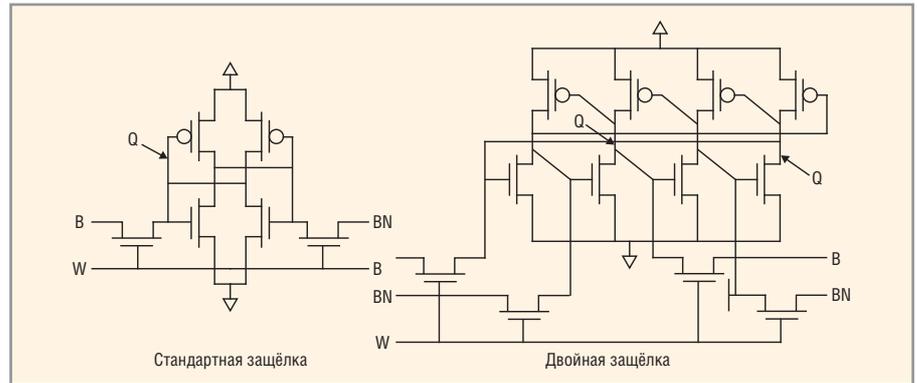


Рис. 2. Структура избыточности ячеек памяти

rection), а также схемами проверки чётности в кэш-памяти.

Процессоры фирмы Atmel сохраняют работоспособность при дозах облучения до 300 крад в соответствии со стандартом Mil Std 883, Test Method 1019. При их использовании в аппаратуре, находящейся на геостационарной орбите, события типа SEU или SET могут происходить не чаще, чем один раз в 200 лет.

В каталог компании 2012 г. включены радиационно-стойкие микросхемы следующих категорий:

- микросхемы ASIC для аэрокосмических систем;

- микросхемы для телекоммуникаций;
- микросхемы FPGA для космических систем;
- микросхемы памяти;
- микропроцессоры для авионики и космических систем;
- микросхемы для военной промышленности и авионики [4].

### Микросхемы ASIC для аэрокосмических систем

Линейка данных микросхем пополняется всякий раз, когда компания внедряет новые технологии.

ATC18RHA – ASIC на базе библиотечных элементов, изготовленных по



Рис. 3. Внешний вид микросхемы ATC18R9A

КМОП-технологии с пятислойной металлизацией и топологическими нормами 0,18 мкм (см. рис. 3). Ячейки памяти для таких ИС разработаны с помощью САПР фирмы Cadence на базе ячеек, устойчивых к одиночным сбоям. В микросхемы также интегрированы устройства обнаружения и исправления ошибок (EDAC). Особенности и основные параметры микросхем:

- обширная библиотека стандартной логики и устройств ввода/вывода;
- возможность использования до 6,5 млн. логических ячеек, эквивалентных NAND2;
- напряжение питания ядра 1,8 В, устройств ввода/вывода – 3,3 В или 2,2 В;
- резервные спаренные буферы (Cold Sparring Buffers); быстродействующие LVDS-буферы (655 Мбит/с); буферы PCI;
- электростатическая устойчивость не менее 2000 В для устройств ввода/вывода, не менее 1000 В для узлов ФАПЧ;
- допустимая доза радиации 300 крад в соответствии со стандартом Mil Std 883, Test Method 1019;
- ни одного случайного переключения и защёлкивания при пороге линейной передачи энергии LET Threshold (LET, Linear Energy Transfer) не более, чем 95 МэВ/мг/см<sup>2</sup> при  $T = 125^\circ\text{C}$ ;
- уровни стандартов качества Mil-Prf 38535 QML-Q и QML-V, ESCC9000;
- триггеры, устойчивые к одиночным отказам;
- диапазон рабочих температур  $-55...125^\circ\text{C}$ ;
- корпус MQFP (до 352 выводов) или MLGA (до 625 выводов).

Предусмотрено пять исполнений микросхем с различным числом контактных площадок (216–544) и используемых логических элементов (от 1 Mgate/ATC18R9A\_216 до 6,5 Mgate/ATC18R9A\_544); размеры корпусов от  $6,19 \times 6,19$  мм до  $14,0 \times 14,03$  мм.

Для работы с микросхемами необходимо получить программные средства (в разделе Tools интернет-страницы компании [www.atmel.com](http://www.atmel.com)), аппаратные средства и образцы ИС (у дистрибьюторов Atmel), документацию и дополнительные справочные материалы (на вкладке Documentation той же интернет-страницы).

Микросхемы MG2RT предназначены для космических приложений типа «море транзисторов», базирующихся на КМОП-технологии с топологическими нормами 0,5 мкм. Массивы микросхем могут состоять из большого числа вентилялей (до 480К), выполненных из трёх слоёв металла с помощью процесса SCMOS 3/2RT. Ячейки ИС отличаются высокой степенью маршрутизации и плотностью памяти. Высокая точность хода встроенных часов достигается применением систем ФАПЧ и программного обеспечения Clock Tree Synthesis Software. Для подавления шумов ячеек и периферии используются специальные методы.

Некоторые другие особенности и параметры микросхем:

- оптимизированная библиотека для синтеза, поэтапного планирования (Floor Plan) и для автоматической генерации тестов (ATG, Automatic Test Generation);
- напряжения питания 3 и 5 В;
- максимальная задержка распространения в памяти NAND2 (при  $U_{\text{пит}} = 4,5$  В) 450 пс; частота переключения триггеров (Toggle Frequency) не менее 610 МГц (при  $U_{\text{пит}} = 4,5$  В);
- потребляемая мощность 1,96 мВт/на элемент/МГц (при  $U_{\text{пит}} = 5$  В);
- матрица с 484 полностью программируемыми контактными площадками;
- CMOS/TTL/PCI-интерфейсы;
- поддержка основных САПР, включая Cadence, Mentor, Vital и Synopsys Reference Platforms;
- образцовые форматы EDIF и VHDL;
- соответствие категории качества Space Quality Grades (SCC, MIL-PRF-38535);
- ни одного случайного переключения и защёлкивания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см<sup>2</sup>;
- испытания на общую дозу облучения 60 крад в соответствии со стандартом MIL 883, Test Method 1019;
- широкий выбор корпусов MQFP и MCGA с числом выводов до 472;
- диапазон рабочих температур  $-55...125^\circ\text{C}$  (максимальная температура кристаллов  $175^\circ\text{C}$ ).

Микросхема MG2RTP с числом вентилялей до 270К. Особенности и параметры приборов (отличные от характеристик MG2RT):

- максимальная задержка распространения в памяти NAND2 (при  $U_{\text{пит}} = 4,5$  В) 505 пс;
- потребляемая мощность 2,7 мВт/элемент/МГц;
- матрица с 360 полностью программируемыми контактными площадками;
- испытания на общую дозу радиации до 300 крад.

Микросхемы MMHIRT – радиационно-стойкие ASIC, выполненные по КМОП-технологии с топологическими нормами 0,35 мкм. Массивы транзисторов и встроенные массивы (Embedded Array) содержат до четырёх металлизированных слоёв для межэлементных связей, до 1,6 млн. вентилялей и до 596 контактных площадок. Высокая плотность и большое число выводов в сочетании с возможностью встраивания IP-ядер делают эти ИС одним из лучших вариантов для системной интеграции. Изделия поддерживаются передовым программным обеспечением на основе отраслевых стандартов и коммерческих инструментов, включая Verilog, DFT, Synopus и Cadence Logic Design Planner.

Другие особенности и параметры микросхем:

- задержка в цепях вентилялей (Gate delay) 170 пс;
- типы памяти SRAM и TPRAM;
- интерфейсы ввода/вывода CMOS, LVTTTL, LVDS, PCI, USB и др.;
- программируемый выходной ток от 2 до 24 мА с шагом 2 мА;
- максимальные частоты 250 МГц (ФАПЧ), 220 МГц (LVDS), 800 МГц (Toggle Frequency) при  $U_{\text{пит}} = 3,3$  В;
- поддержка субмикронных САПР (Deep Submicron CAD Flow);
- ни одного случайного переключения и защёлкивания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см<sup>2</sup>;
- триггеры, устойчивые к одиночным отказам;
- испытания на общую дозу радиации 300 крад в соответствии с Mil STD 883, Test Method 1019;
- градации качества QML Q и V в соответствии с SMD 5962-01B01 и 5962-08B01; ESCC QML в соответствии с ESCC 9202/076;
- поддержка САПР Cadence (доступные инструменты: NCsim-Verilog Simulator; Encounter TM-Floorplan-

ner; RTL compiler Synthesis (Ambit)); Mentor/Model Tech (доступные инструменты: Questasim/Modelsim Verilog и VHDL (VITAL) Simulator; DFT-Scan insertion и ATPG, BIST); Synopsys (доступные инструменты: Design Compiler™-Synthesis; Primitime-Static Path; Formality-Equivalence Checking; DFTmax-Scan insertion и ATPG);

- варианты корпусов: MQFP- 132, 196, 256 и 352 вывода, MCGA и MLGA – 349 выводов, 472 вывода (шаг 1,27 мм).

## МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВ

Для ряда ключевых клиентов компания Atmel перерабатывает некоторые специализированные ИС в стандартные продукты, имеющие наибольший спрос на рынке. Одним из таких вариантов является набор изделий SpiceWire, позволяющих создавать сети на основе радиационно-стойких микросхем.

*AT7910E 10× SpaceWire Router* – данный маршрутизатор обеспечивает возможность коммутации узлов. Прибор состоит из восьми интерфейсов SpaceWire и матрицы маршрутизации, которая позволяет передать пакеты данных с одного устройства на другие. Микросхемы изготавливаются на основе библиотеки ячеек MН1RT по КМОП-технологии с нормами 0,35 мкм.

*AT7911E* – строенный быстродействующий контроллер SpaceWire link (см. рис. 4). Микросхема содержит интерфейс связи между тремя линиями SpaceWire в соответствии со спецификацией стандарта ECSS-E-50-12A, а также узел обработки данных, состоящий из микропроцессора и памяти данных. Микросхемы производятся на основе библиотеки устойчивых к одиночным сбоям ячеек (MG2RT) и поддерживают выполнение основной части протоколов межпроцессорных связей.

*AT7912E* – одинарный быстродействующий контроллер, обеспечивающий связь между интерфейсом SpaceWire и другими интерфейсами (см. рис. 5). Микросхема изготавливается на основе SEU-библиотеки радиационно-стойких ячеек MG2RT.

## МИКРОСХЕМЫ FPGA ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При проектировании космических систем с относительно небольшим количеством вентилях (Low gate count designs) существует тенденция к использованию микросхем FPGA вместо

ASIC. Пользуясь опытом в разработке элементов, не подверженных одиночным сбоям, компания Atmel успешно доработала свои коммерческие статические ОЗУ на основе перепрограммируемых FPGA для использования в жёстких условиях.

*AT17LV010-10DP* – последовательное ЭСППЗУ, позволяющее организовать простую в использовании и эффективную память для одной или нескольких микросхем FPGA. Особенности и некоторые параметры микросхемы:

- энергоэффективная технология КМОП (EEPROM Process);
- системное программирование через двухпроводную шину;
- простой интерфейс для ОЗУ FPGA;
- совместимость с приборами AT40K;
- возможность каскадирования для поддержки дополнительных конфигураций или для массивов высокой плотности;
- малая мощность потребления в режиме ожидания;
- долговечность  $5 \times 10^4$  циклов считывания, сохранность данных 10 лет;
- ни одного случайного срабатывания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см<sup>2</sup>;
- испытания на общую дозу радиации 60 крад;
- диапазон рабочих температур  $-55...125^{\circ}\text{C}$ , напряжение питания 3...3,6 В;
- корпус FPDIL 28.

*AT40KEL040* – последовательное ЭСППЗУ для организации простой и эффективной памяти для одной или нескольких микросхем FPGA (см. рис. 6). *AT69170E* – ЭСППЗУ с организацией 4 М×1 бит для FPGA.

*ATF280* – статическое ОЗУ на основе FPGA для космических систем. Изготавливается по КМОП-технологии Atmel AT58KRHA с нормами 0,18 мкм (см. рис. 7). Структурная схема ИС приведена на рисунке 8, на рисунке 9 показана плата отладки на базе ATF280.

## МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ

*AT28C010-12K* – параллельное ЭСППЗУ 1 Мбит (128К×8).

*AT60142F/FT* – маломощное КМОП статическое ОЗУ 512К×8.

*AT60142H/HT* – усовершенствованное маломощное статическое ОЗУ 512К×8.

*AT65609ENV* – маломощное КМОП статическое ОЗУ 128К×8.

*AT55609ENHW* – маломощное КМОП статическое ОЗУ 8К×8.

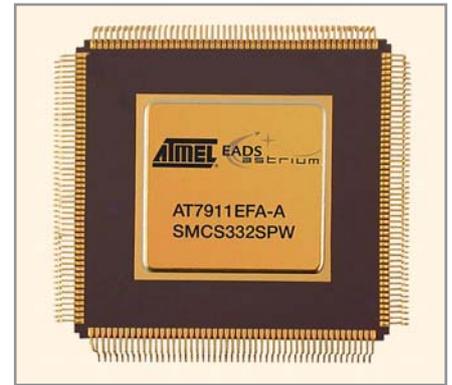


Рис. 4. Внешний вид микросхемы AT7911EFA

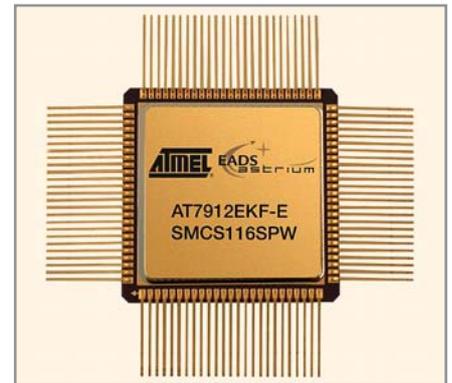


Рис. 5. Внешний вид микросхемы AT7912EKF



Рис. 6. Внешний вид микросхемы AT40KFL

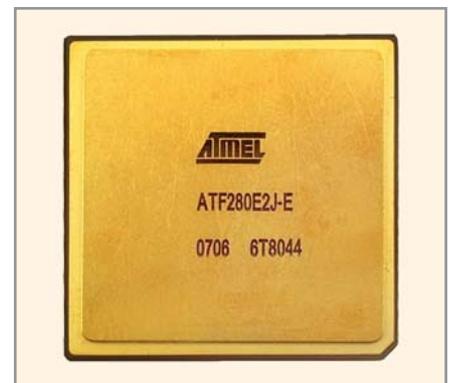


Рис. 7. Внешний вид микросхемы ATF280E

*AT68166F/FT* – мультикристалльный модуль статического ОЗУ с напряжением питания 3,3 В/5 В.

*AT68166H/HT* – усовершенствованный мультикристалльный модуль статического ОЗУ.

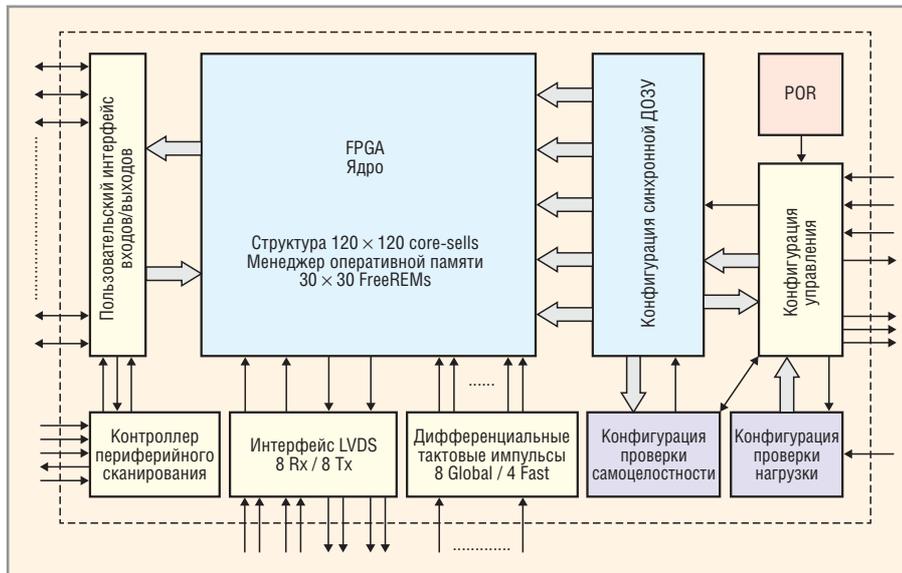


Рис. 8. Структура микросхемы ATF280E

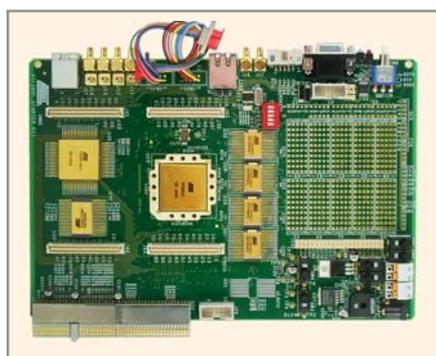


Рис. 9. Плата отладки на базе ATF280E



Рис. 10. Внешний вид микросхемы AT697E

AT69170E – ЭСППЗУ для FPGA объемом 4 Мбит.

### МИКРОПРОЦЕССОРЫ

Последние 15 лет компания Atmel последовательно придерживалась микропроцессоров, основанных на архитектуре SPARK. Версия Sparc V8-AT697 была разработана при поддержке Европейского космического агентства, что свидетельствует о растущем спросе

на микропроцессоры для бортовых компьютеров.

AT697E – высокопроизводительный 32-разрядный встраиваемый RISC-процессор высокой степени интеграции, выполненный на базе архитектуры SPARK V8 (см. рис. 10). Процессор основан на отказоустойчивой модели LEON 2 Европейского космического агентства. При выполнении большинства инструкций за один такт, произво-

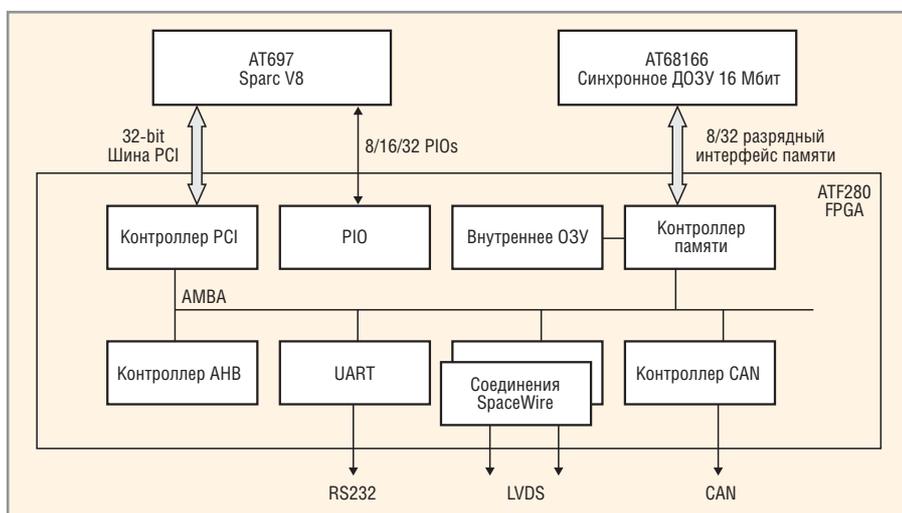


Рис. 11. Структурная схема применения микросхем ATF280, AT697, AT68166

дительность процессора приближается к 1 MIPS/МГц. Микропроцессор предназначен для использования в качестве компонента компьютеров для бортовых приложений реального времени. Он предоставляет современные функциональные возможности и обеспечивает высокую для космической техники производительность. Для построения законченного бортового компьютера к микропроцессору необходимо подключить внешнюю память и необходимые периферийные устройства (см. структурную схему на рисунке 11). Основные параметры микропроцессора:

- расширенная архитектура включает стандартную внутреннюю шину Amba Bus для построения системы на кристалле, пятиступенчатую конвейерную организацию; 32 Кбит ассоциативной четырёхходовой кэш-памяти инструкций; 16 Кбит ассоциативной двухходовой кэш-памяти данных;
- периферия на кристалле включает интерфейсы памяти PROM, SRAM, SDRAM, два 24-разрядных таймера, сторожевой таймер, два восьмиразрядных UART; контроллер прерываний с четырьмя внешними программируемыми входами; 32 параллельных интерфейса ввода/вывода; интерфейс PCI 2.2 (33 МГц); интегрированный 64/32-разрядный модуль операций с плавающей точкой по IEEE 754;
- высокая отказоустойчивость за счёт применения полного тройного резервирования (TMR), обнаружения и исправления ошибок (EDAC), проверки чётности (Parity Protection);
- отладочное и испытательное оборудование включает интерфейс JTAG по IEEE 1149.1, внутрисхемный эмулятор (DSU, Debug Support Unit), четыре точки наблюдения (Four Hardware Watchpoint);
- 8-, 16- и 32-разрядные интерфейсы boot-PROM (флэш) с возможностью организации EDAC;
- диапазоны рабочих температур и напряжений питания –55...+125°C и 3,3 ± 0,3 В В для ввода/вывода, 1,8 ± 0,15 В для ядра;
- тактовая частота до 100 МГц при мощности потребления до 1 Вт;
- производительность 86 MIPS (Dhrystone 2.1), 23 MFLOPS (Whetstone);
- общая доза радиации до 60 крад (Si); SEU-поток ошибок менее чем

$1 \times 10^{-5}$  ошибок/прибор/в день  
(1 E-5 error/device/day);

- ни одного случайного срабатывания при пороге линейной передачи до 70 МэВ/мк/см<sup>2</sup>;
- корпуса MCGA-349 (9g) и MQFP-256;
- отладочные средства включают AT697 Evaluation Board, AT697E Sample.

Особенности микропроцессора AT697F (отличия от AT697E):

- общая доза радиации до 300 крад;
- отладочные средства AT697F.

AT7913E – контроллер терминалов дистанционного управления для телекоммуникационных сетей SpaceWire (см. рис. 12). Микросхема представляет собой систему на кристалле, выполняющую задачи ядра LEON2-FT SPARC V8 совместно с MEIKO FPU (стандарт IEEE-754). Такая архитектура позволяет эффективно выполнять обработку данных на уровне платформы и мощную обработку данных на уровне полезной нагрузки (payload level). Она включает в себя интерфейсы CAN и SpaceWire для надёжной скоростной передачи информации от сетей датчиков, встроенный микропроцессор, CAN-контроллер, АЦП/ЦАП, стандартные интерфейсы и ресурсы (UART, таймеры, устройства ввода/вывода). Другие параметры микросхемы:

- 4 Кбит кэш-памяти инструкций, 4 Кбит кэш-памяти данных;
- контроллер прерываний;
- интерфейсы ОЗУ, GPIO, FIFO, JTAG;
- две двунаправленные линии SpaceWire с поддержкой RMAP, полнодуплексные коммуникации (от 1,25 до 200 Мбит/с в каждом направлении);
- диапазон рабочих напряжений питания и температур 1,65...1,95 В (ядро), 3...3,6 В (ввод/вывод), -55...125°C;
- потребляемая мощность 1 Вт при  $f_{\text{такт}} = 50$  МГц;
- общая доза радиации до 300 крад (Si) в соответствии со стандартом MIL-STD883, Test Method 1019;
- ни одного случайного срабатывания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см<sup>2</sup>;
- размещение в корпусах MCGA, MLGA (349 выводов), CQFP (352 вывода).

Микросхема TSC695F – высокопроизводительный 32-разрядный встраиваемый RISC-процессор высокой степени интеграции (архитектура SPARC V7). Разработан при поддержке Европейского космического агентства по КМОП-технологии с нормами 0,5 мкм и предназначен для встра-

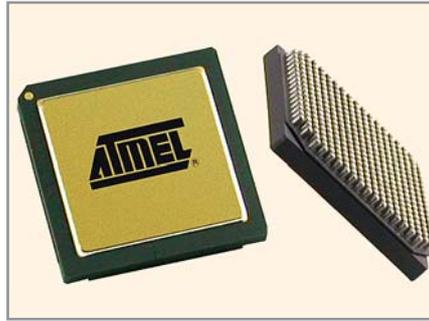


Рис. 12. Внешний вид микросхем AT913E

иваемых приложений космических систем. Основные параметры микропроцессора:

- генератор и контроллер чётности и EDAC, арбитр ЦДП, таймеры (GPT, RTCT, WDT); контроллер прерываний (пять внешних входов);
  - интерфейс памяти, GPI, двоянный UART, ОЗУ с оптимизацией скорости кода; 8- или 40-разрядный загрузочный флэш-интерфейс;
  - тестовый порт доступа (TAP, Test Access Port) по IEEE 1149.1;
  - производительность 20 MIPS/5 MFlops (двойная точность) при  $f_{\text{сист}} = 25$  МГц;
  - диапазон напряжений питания и рабочих температур 4,5...5,5 В и -55...125°C;
  - общая доза радиации до 300 крад (Si) в соответствии со стандартом MIL STD 883, Test Method 1019;
  - ни одного случайного срабатывания и защёлкивания при пороге линейной передачи до 80 МэВ/мг/см<sup>2</sup>;
  - градации качества ESCC/9512/003 и QML-Q или V/5962-00540;
  - корпус MQFPF 256, технология безэлектродной сварки золотосодержащим сплавом.
- Микросхема TSC695FL (основные отличия от TSC695F):
- производительность 12 MIPS/3 MFlops при  $f_{\text{сист}} = 15$  МГц;
  - напряжение питания 3,15...3,45 В.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [http://www.edn.com/article/470298-Cosmic\\_radiation\\_comes\\_to\\_ASIC\\_and\\_SOC\\_design.php](http://www.edn.com/article/470298-Cosmic_radiation_comes_to_ASIC_and_SOC_design.php).
2. Mayer D.C., Laco R.C. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation. Vol. 4, № 2. Crosslink. <http://www.aerospace.org/wp-content/uploads/crosslink/CrosslinkV4N2.pdf>.
3. <http://www.eetimes.com/electronics-products/fpga-pld-products/4078581/Radiation-tolerant-FPGA-density-climbs-to-four-million-gates>.
4. [http://www.atmel.com/products/other/space\\_rad\\_hard\\_ics/default.aspx](http://www.atmel.com/products/other/space_rad_hard_ics/default.aspx). 