

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СБИС ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ: ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Авторы – специалисты Федерального космического агентства, Отраслевого центра проектирования СБИС ОАО "Российские космические системы", НПП "Цифровые решения" – излагают свое видение проблемы проектирования специализированных СБИС для аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ). Предлагаемые ими решения направлены на сокращение сроков и, соответственно, стоимости разработки специализированных СБИС и повышение качества аппаратуры.

ОСОБЕННОСТИ ТРЕБОВАНИЙ К ЭКБ РКТ

В последние два-три года вопросам обеспечения качества и надежности аппаратуры ракетно-космической техники уделяется колоссальное внимание. Это и совещания с участием первых лиц государства, и соответствующие решения Федеральных агентств и ведомств. Появились и публикации в отраслевых изданиях [1, 2], посвященные данной проблематике. Внеся и мы свою лепту в обсуждение столь важной проблемы.

Прежде всего, попытаемся определиться – что же такое космическая микроэлектроника и чем же она отличается от общепромышленной? К основным особенностям электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой в условиях космического пространства, относятся:

- широкая функциональная номенклатура (по данным ESCIES* – порядка 1500 наименований);
- крайне малая серийность (от 10–15 шт. (!) до 100 тыс. шт. на протяжении всего жизненного цикла изделия);
- высокие требования к надежности (безотказность, ресурс, сохраняемость): $\lambda = 10^{-9}$ – 10^{-10} для активных элементов и $\lambda = 10^{-11}$ – 10^{-12} для пассивных при малосерийном производстве ЭКБ;
- стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (по данным escies.org – не менее 50 крад), других специфических дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФ КП);
- расширенный температурный диапазон (от -60 до 125°C);
- необходимость обеспечения длительных сроков безотказной работы (15 лет и более).

* Координационный центр Европейского космического агентства по применению электронных компонентов для космических программ.

А.Бумагин, к.т.н.; Ю.Гулин, к.т.н.; С. Заводсков;
В.Кривякин; А.Руткевич; В.Стешенко, к.т.н.;
А.Сухоруков; О. Шишкин

Уже это краткое перечисление особенностей ЭКБ для РКТ говорит о том, что развитие космической микроэлектроники идет путем, отличным от магистрального пути развития электроники общепромышленной, определяемой ITRS [3–5]. Прежде всего, это касается крайне низких потребных объемов выпуска. Тенденция уменьшения проектных норм изготовления СБИС в общепромышленной и потребительской электронике в первую очередь связана со стремлением получить как можно больше кристаллов с одной пластины, поскольку стоимость пластины составляет 800–1800 долларов, при этом с уменьшением размера кристалла в два раза выход увеличивается в четыре [1].

В стоимость специализированных СБИС основной вклад вносят затраты на подготовку производства и проведение испытаний. Так, в среднем цена подготовки производства (изготовление фотошаблонов) и выпуска опытной партии в 10–12 пластин ("инженерный лот") на фабриках Юго-Восточной Азии (X-fab Sarawak, Silterra и т.п.) по технологии 0,18 мкм составляет 120 тыс. долл., при проектных нормах 0,13 мкм – 350 тыс. долл., а по технологии 0,09 мкм – около 1 млн. долл. Близкие цены на производство по проектным нормам 0,18 мкм были озвучены на недавнем (3 декабря 2009 года) совещании в ОАО "НИИМЭ и Микрон".

Что касается испытаний, то их стоимость определяется комплексами стандартов и дополнительными требованиями заказчиков. Как уже отмечалось в [1], в существующих стандартах "...большинство методик испытаний ЭКБ на радиационную стойкость соответствуют воздействиям, присущим ядерному взрыву. Но космическое пространство обладает иной спецификой. Это относительно низкие по интенсивности электронное и протонное излучения от естественных радиационных поясов Земли, воздействующие на космический аппарат в течение длительного времени, а также тяжелые заряженные частицы космического пространства и высокоэнергетические протоны".

В настоящее время принята достаточно полная международная классификация эффектов, вызываемыми ДФ КП, имеющими не только радиационный характер. Приведем лишь

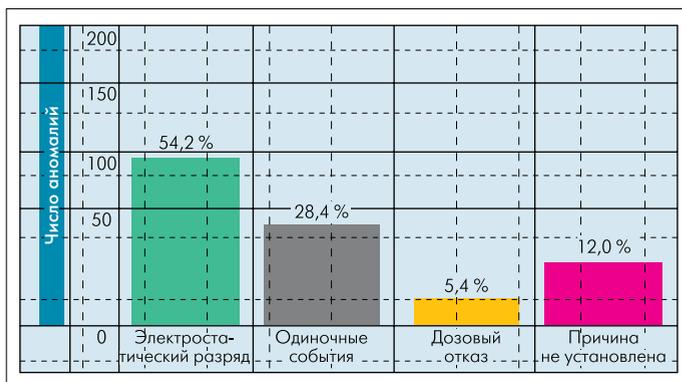


Рис. 1. Распределение числа аномалий в функционировании РЗА КА в зависимости от причины аномалии. (Данные по 299 аномалиям [6])

небольшую статистику (рис.1) по влиянию различных дестабилизирующих факторов на аппаратуру РКТ [6]. Однако до сих пор "большим" вопросом остается отсутствие положения об ЭКБ космической категории качества (аналог категории Space), учитывающего принципиальные особенности функционирования в условиях воздействия ДФ КП [7].

За рубежом вопросам разработки и поддержания актуальности нормативной документации уделяется большое внимание. В частности, существует обширная система стандартов и спецификаций Министерства обороны США, описывающая как требования, так и методики разработки и производства ЭКБ космической категории качества (см. врезку). Большинство из них находится в свободном доступе в Интернете на официальных сайтах учреждений МО США и его контрагентов (например, snebulos.mit.edu/projects/reference, assist.daps.dla.mil/quicksearch, www.dscccols.com и др.).

Разработкой соответствующей нормативной документации также занимаются и Европейское космическое агентство (ЕКА) в лице ESCIES (www.escies.org). Есть соответствующие службы и в структуре НАСА (nerr.nasa.gov). Безусловно, обязательной является сертификация разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества в соответствии со стандартом ISO 9001:2008.

На рис.2 на примере компании Aeroflex Colorado Springs (www.aeroflex.com) показана схема сертификации разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества. Как можно заметить, контрольные процедуры и сертификация предусмотрены на всех этапах жизненного цикла изделия.

Также отметим, что у ЭКБ космического применения, как правило, очень длительный жизненный цикл, для относительно серийных компонентов служебной аппаратуры (контрольно-измерительные системы, системы управления электропитанием, телеметрия и т.п.) период выпуска прибора может превышать 20 лет. Учитывая и длительные сроки разработки, определяемые в первую очередь огромным объемом испытаний аппаратуры, наземной отработкой, летными испытаниями, можно говорить о том, что ключевые компоненты должны находиться в производстве достаточно долго, что противоре-

Основные стандарты МО США в области ЭКБ категории space:

- MIL-STD-883. Test methods standard. Microcircuits
- MIL-STD-750. Test method standard. Semiconductor devices
- MIGSTD-15478. Electronic parts, materials, and processes for space and launch vehicles
- DOD-E-8983. Electronic Equipment, Aerospace, Extended Space Environment, General Specification
- MIL-PRF-19500 – Semiconductor Devices, General Specification For.
- MIL-PRF-38534 – Hybrid Microcircuits, General Specification For.
- MIL-PRF-38535 – Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification For.
- QML-38535. Qualified Manufacturers List
- MIL-STD-1523. Age Controls of Age Sensitive Elastomeric Materials for Aerospace Applications
- MIL-STD-1580. Destructive Physical Analysis for Space Quality Parts
- MIL-STD-1540. Test Requirements for Launch & Space Vehicles
- MIL-HDBK-217. Reliability Prediction of Electronic Equipment
- MIL-HDBK-263. Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies
- MIL-HDBK-343. Design, Construction, and Test Requirements for One-of-a-Kind Spacecraft

чит современному состоянию микроэлектроники, где сменяемость типов микроконтроллеров и ПЛИС происходит каждые 2–3 года, а то и чаще (рис.3). Налицо противоречие между требованиями к жизненному циклу аппаратуры и реальной сменяемостью поколений ЭКБ.

Поэтому, несмотря на наметившуюся тенденцию активного применения ЭКБ класса industrial в аппаратуре РКТ, этому препятствует ряд факторов. Помимо недостаточных гарантируемых изготовителем показателей сохраняемости, надежности и радиационной стойкости, очень велики затраты на сертификацию такой ЭКБ и дополнительные испытания, по стоимости соизмеримые с разработкой и изготовлением специализированной ЭКБ. Из-за крайне ограниченного во времени жизненного цикла ЭКБ категории industrial необходимы весьма затратные работы либо по перевыпуску конструкторской и технологичес-

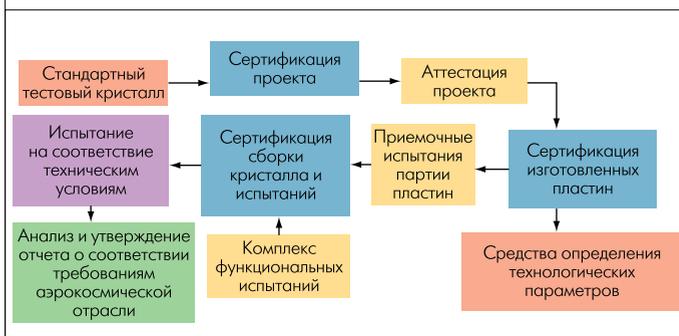


Рис.2. Схема сертификации разработки и производства ЭКБ космического применения (на примере компании Aeroflex Colorado Springs)

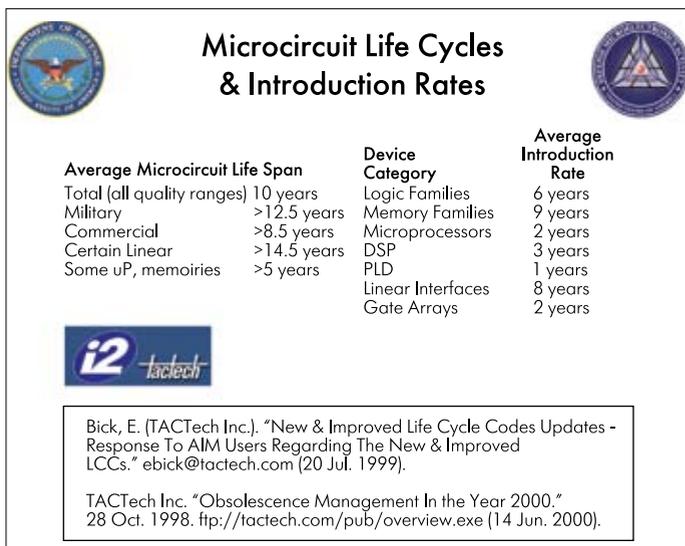


Рис.3. Данные о длительности жизненного цикла наиболее популярных типов СБИС (по материалам конференции DSMS Conference 2002, New Orleans, Louisiana). За минувшие семь с лишним лет ситуация практически не изменилась

О приоритетах в вопросе "самосинхронной электроники"

Обзор самосинхронных схем был рассмотрен в статье [10]. Однако в ней неверно указаны данные о приоритете в этой области. Первый самосинхронный процессор был разработан значительно раньше 1994 года, и не в университете Манчестера, и не на идее, опубликованной в 1989 году Сатэрлендом. В 1974–1975 годах в Зеленограде был разработан (и поставлен в серийное производство, что немаловажно, не так ли?) комплект 4-разрядного КМОП-микросхемного процессора серии 587. Главным конструктором этого микросхемного процессора и автором идеи асинхронного (по сути – то же самое, что "самосинхронного") взаимодействия как между блоками внутри чипов, так и между микросхемами микросхемного комплекта был В.Л.Дшхунян (сегодня – генеральный директор ОАО "Ангстрем"). Далее, в 1975–1981 годах в Минске, в НПО "Интеграл" совместно и под идейным руководством В.Л.Дшхуняна был разработан и также освоен в серийном производстве 16-разрядный КМОП МП серии 588, главным конструктором которого был В.А.Шиллер. Цикл статей о комплекте БИС 588 серии в 1981 году была опубликована в журнале "Электронная промышленность". Для относительно медленных в то время КМОП ИС идея В.Л.Дшхуняна о квитировании нетактируемых (асинхронных) передач была блестящей. Она позволила существенно увеличить фактическую производительность КМОП-микросхемных процессоров и обеспечить их функционирование в широком диапазоне температур и спецвоздействий.

Мы признательны Виктору Александровичу Шиллеру за замечательную неточность в предыдущей публикации и ценные сведения, подтверждающие, что в этой области работы советских специалистов опережали зарубежные на 20 лет!

кой документации и проведению дополнительных дорогостоящих испытаний аппаратуры, либо выпуску изделий-аналогов.

Таким образом, ключевая задача при создании ЭКБ для РКТ – обеспечение приемлемой стоимости малосерийного производства при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного жизненного цикла, надежности, стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости. Рассмотрим пути решения обозначенных проблем в существующих условиях.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СТОЙКОСТИ ЭКБ ДЛЯ РКТ

Современные подходы к повышению надежности специализированной ЭКБ, стойкой к ДФ КП, можно разделить на четыре большие группы (рис.4). К технологическим методам относятся использование специализированных технологических процессов изготовления СБИС и специализированных материалов – технологий "кремний на сапфире" (КНС), "кремний на изоляторе" (КНИ), специализированных операций легирования и т.п. Все эти способы чрезвычайно дорогостоящи, и поэтому их используют лишь немногие производства. В частности, ведущими производителями подобных структур являются такие компании США, как Honeywell, Peregrine semiconductors и ряд других. К конструктивным способам повышения стойкости следует отнести использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т.п.

К схемотехническим методам повышения радиационной стойкости, в том числе – стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), относятся применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, т.н. "усиленных" библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов и ряд других приемов (рис.5).

Большинство схемотехнических методов можно разделить на две группы – методы контроля и коррекции ошибок и методы резервирования. К первой группе относятся методы избыточного кодирования, такие как контроль по четности или кодам Хэмминга, мажорирование и ряд других. Все они предполагают постоянную работу избыточной аппаратуры вместе с основной для обнаружения и, по возможности, исправления ошибок. Ко второй группе относятся методы, основанные на контроле работоспособности и автоматической замене неисправных блоков резервными.

Основное достоинство схемотехнических методов повышения радиационной стойкости – возможность их реализации на фабриках со стандартной, предназначенной для массовой продукции технологией. Такой подход получил международное название Rad hard by design [8, 9]. Так, французская компания MHS обеспечивает таким путем гарантированную стойкость порядка 100 крад для микросхем на объемном кремнии. Аналогично работает компания Aeroflex, используя обычные технологические линейки ведущих производителей. Применительно



Технологические способы	Использование специализированных техпроцессов изготовления СБИС и специализированных материалов ("кремний на сапфире" (КНС), "кремний на изоляторе" (КНИ), использование гетероструктур и т.п.)	Высокая цена, отсутствие необходимых материалов и оборудования
Схемотехнические способы	Использование библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, т.н. "усиленных" библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов	Возможность реализации на стандартных техпроцессах, относительная дешевизна. Стойкость к ТЗЧ
Конструктивные способы	Использование специальных корпусов, локальной защиты, покрытий и т.п.	Необходимость применения специализированных материалов для корпусов
Моделирование эффектов ИИ КП на этапе проектирования ЭКБ	Прогнозирование стойкости элементов и аппаратуры на этапе проектирования с использованием специализированных компонентов САПР и моделей компонентов	Необходимость разработки специализированных программных продуктов

Рис.4. Подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства

к России, подобный подход позволяет использовать как уже существующие мощности зарубежных фабрик, так и вводимые мощности ОАО "НИИМЭ и Микрон" и ОАО "Ангстрем". Метод Rad hard by design обеспечивает повышение стойкости, сопоставимое с применением специальной технологии, но при существенно (в 5–7 раз) меньшей стоимости.

В частности, методология Rad hard by design была апробирована в ОАО "Российские космические системы" и НПП "Цифровые решения" в ходе выполнения НИР и ОКР по созданию надежных СФ-блоков и СБИС. В ОАО "Российские космические системы" был разработан СФ-блок контроллера памяти с использованием защитных кодов Рида-Соломона. Этот код обладает оптимальным кодовым расстоянием, т.е. при заданной длине контрольной суммы данный код исправляет максимально возможное число ошибок. Коды Рида-Соломона удобны при работе с памятью. Так как в флеш-памяти доступ организован постранично, целесообразно кодировать страницу целиком, при этом контрольная сумма будет располагаться в ее конце.

Другой подход, позволяющий повысить стойкость к одиночным событиям и проконтролировать работоспособность

СБИС, – проектирование СБИС на принципах самосинхронности [10]. В результате работ, проведенных в НПП "Цифровые решения", получены схемные и топологические реализации самосинхронных СФ-блоков процессорных и периферийных узлов. При самосинхронном подходе каждый комбинационный блок после завершения переходных процессов должен выработать сигнал готовности, по которому осуществляется синхронизация предыдущих блоков, тем самым обеспечивая логическое упорядочивание событий.

Самосинхронный подход к проектированию имеет следующие преимущества:

- максимально возможное быстродействие, определяемое только технологическими параметрами, условиями эксплуатации и типом обрабатываемой информации;
- наиболее широкий диапазон температур эксплуатации и уровней питающего напряжения;
- наилучшая энергетическая эффективность, поскольку отсутствуют энергетически затратные цепи передачи тактовых сигналов, а также используется автоматический перевод в энергосберегающий режим части схемы, на вход которой не поступают данные;
- не требуются дополнительные ресурсы на распределение высокоскоростных тактовых сигналов по схеме с высокими требованиями к фазовым сдвигам, поскольку синхронизация отдельных блоков локальна;
- колебания внешних условий и параметров технологического процесса приводят только к изменению быстродействия и не вызывают сбоев (при условии сохранения переключающей способности элементов), поэтому самосинхронные схемы устойчивы.

Промежуточное положение между технологическими и конструктивными подходами занимают методы, основанные на незначительной модификации существующей технологии, сочетающие конструкторские и технологические решения. К ним относят и повышение стойкости БИС на основе базовых матричных кристаллов.

Как известно [11–13], наибольшее влияние на КМОП-схемы оказывают поверхностные эффекты на границе кремний-диэлектрик. Под влиянием ионизирующей радиации генерируются

Транзистор	Регистр	Кэш	Память	Система
Транзисторная схема с резервированием (Multiple Interconnected Redundant Transistors - MIRT)	Логические функции, выполненные на стандартных библиотечных элементах с использованием технологии MIRT	Кэш с прямой записью и контролем четности для определения сбоев	Применение эффективных блочных кодов для коррекции сбоев в соседних ячейках памяти	Применение традиционных системотехнических решений

Рис.5. Приемы повышения отказоустойчивости компонентов цифровых систем

электронно-дырочные пары, положительно заряженные дырки, ввиду их малой подвижности, захватываются в ловушки диэлектрика. С увеличением накопленной дозы протонного излучения увеличивается положительный заряд диэлектрика и сдвиг уровня порогового напряжения рабочих и паразитных МОП-транзисторов. В большей степени это касается n-канальных транзисторов, управляемых положительным потенциалом. Таким образом, при использовании стандартных технологий объемного кремния основная задача – получить транзисторы с малым сдвигом порогового напряжения и большим пробивным напряжением. Для этого используются технологические методы, направленные на улучшение качества подзатворного окисла. С уменьшением толщины подзатворного окисла влияние накопленной дозы уменьшается (именно этим и объясняются достаточно высокие характеристики по этому параметру СБИС на объемном кремнии с проектными нормами 0,18–0,25 мкм), снижается и сдвиг порогового напряжения, но падает и пробивное напряжение. Например, в стандартный технологический маршрут вводят отжиг подзатворного окисла при температуре около 900°C, обеспечивающий более однородную структуру SiO₂. Однако с повышением температуры отжига растет сдвиг порогового напряжения. Кроме того, на величину напряжения пробоя влияет расстояние между охранным кольцом и областью стока, а также концентрация носителей в охранный кольце (от нее зависит уровень порогового напряжения паразитных транзисторов). Изменяя эти параметры в рамках стандартных технологических маршрутов, можно обеспечить необходимые уровни стойкости.

Отдельное внимание следует уделить моделированию эффектов ДФ КП на этапе проектирования СБИС. Существующие стандартные средства проектирования в общем случае [3, 4, 14] не предусматривают специальных процедур оценки потенциальной стойкости СФ-блоков и СБИС к ДФ КП. Этот вопрос до сих пор практически не проработан. Очевидно, необходима разработка отечественных средств проектирования и соответствующих моделей. Определенные шаги в этом направлении предприняты в Отраслевом центре проектирования СБИС при участии разработчиков отечественной САПР AVOCAD (коллектив В.Н.Перминова). Отечественная САПР AVOCAD [15–17] позволяет встраивать заказные модели полупроводниковых элементов для микроэлектроники, в том числе модели элементов, учитывающие влияние ионизирующих излучений космического пространства. В Отраслевом центре проектирования СБИС уже ведутся работы по интеграции этой системы в единый маршрут проектирования "комплекс – аппаратура – компоненты". Полученные результаты позволяют говорить о возможности создания маршрута проектирования СБИС, учитывающего их поведение в условиях воздействия ДФ КП. Совместно с использованием специальных схемотехнических приемов, такой подход позволяет значительно снизить число итераций при отработке схемотехники и значительно уменьшить стоимость разработки.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПОДХОДЫ

Основной проблемой, с которой всегда сталкиваются разработчики и производители ЭКБ для космических применений, – соединить "лед и пламень", т.е. обеспечить малую серийность при большой номенклатуре. Большая номенклатура изделий влечет необходимость применения большого числа технологических процессов, которые обеспечиваются дорогостоящим технологическим оборудованием, сырьем, материалами, необходимостью непрерывного обслуживания и т.п. Учитывая крайне малую серийность большинства изделий, необходимо предусмотреть подходы, позволяющие обеспечить унификацию типовых решений.

Прежде всего, следует различать аппаратуру служебных и целевых систем космических аппаратов, а также четко понимать ориентировочную серийную потребность в изделиях. К аппаратуре служебных систем КА относятся системы телеметрии, электропитания и командно-измерительные системы. Учитывая, что большинство КА строятся на базе типовых платформ, можно говорить о том, что аппаратура служебных систем в известной степени унифицирована и выполняет одни и те же функции независимо от целевой задачи аппарата. Так, телеметрия не зависит от того, выполняет ли аппарат функции дистанционного зондирования, связи или навигации. Кроме того, платформы КА живут долго, следовательно жизненный цикл приборов служебных систем и компонентов для них также должен быть длительным. Серийность таких систем составляет сотни и даже тысячи приборов. К аппаратуре служебных систем, как правило, не предъявляются сверхвысоких требований по скорости обработки информации, производительности и т.п. Таким образом, для реализации компонентов аппаратуры служебных систем не требуются технологии глубоко субмикронного уровня.

Аппаратура целевых систем, как правило, уникальна для каждого КА. Особенно ярко это проявляется на аппаратуре межпланетных КА, где говорить о серийности не приходится, потребность по каждому типоминералу вряд ли превысит десятки штук. Определенную серийность имеет целевая аппаратура спутниковых систем связи и навигации, состоящих из достаточно большого числа аппаратов – таких как ГЛОНАСС, "Гонец" и т.п. Но в отличие от аппаратуры служебных систем, к компонентам целевых системам часто предъявляются достаточно высокие требования по быстродействию и производительности.

Посмотрим на проблему с точки зрения технологической реализуемости на отечественных производственных мощностях. Их состояние в настоящий момент хорошо известно и неоднократно освещалось на страницах печати. По большому счету, с точки зрения проектирования и производства, сейчас доступны 0,8-, 1,5- и 3-мкм технологии на ОАО "НИИМЭ и Микрон", ОАО "Ангстрем", ГК "НПК "Технологический центр МИЭТ", и на НПО "Интеграл" (Минск). Кроме того, имеется ряд кремниевых производств на предприятиях Минпромторга и Роскос-



Рис.6. Перспективы производства ЭКБ космического уровня качества на отечественной технологической базе

моса. Отрадным событием стала заявленная 3 декабря 2009 года готовность ОАО "НИИМЭ и Микрон" к размещению заказов на производство как тестовых кристаллов, так и серийных партий изделий по быстродействующей кремниевой технологии 0,18 мкм. Получение библиотек и правил проектирования, при заключении соглашения о конфиденциальности, не вызывает проблем. В 2011–2012 годах предполагается внедрение технологии уровня 90 нм.

Что касается ОАО "Ангстрем", то там идет работа по монтажу технологического оборудования и есть надежда, что к 2011–2012 годам будет доступен техпроцесс с проектными нормами 0,13 мкм. Библиотеки и правила проектирования также можно получить уже сейчас при заключении соответствующего соглашения.

Таким образом (рис.6), в ближайшей перспективе (до 2015 года) возможен переход на преимущественное использование отечественной ЭКБ в аппаратуре служебных систем КА. Что касается аппаратуры целевых систем, то там еще долго будет использоваться значительная доля ЭКБ зарубежного производства, причем зачастую индустриального уровня качества (в силу отсутствия ЭКБ космического уровня качества, обеспечивающей требуемые функциональные характеристики (быстродействие, логическая емкость, объем памяти и т.п.). И разработчикам аппаратуры надо понимать эту ситуацию при формировании заявок и перечней на разработку ЭКБ.

Несмотря на то, что в России зарождаются первые субмикронные производства, следует отдавать себе отчет в том, что ряд технологий в ближний и среднесрочный период не появятся. Достаточно проанализировать текст ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы (см. например, www.fasi.gov.ru), чтобы понять, что в ближайшие 5–10 лет не следует ожидать появления технологий радиационно стойкой памяти большой

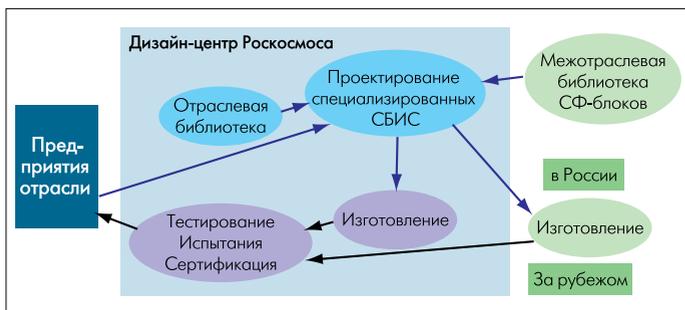


Рис.7. Кооперация при разработке и производстве специализированной ЭКБ космического применения

емкости, флеш-памяти, технологий ПЛИС типа antifuse и т.п. Это означает, что при проектировании аппаратуры необходимо разумное сочетание отечественной и импортной ЭКБ, а при формировании номенклатуры следует учитывать текущие возможности и перспективы развития микрoeлектронных производств.

Соответственно, при планировании работ по разработке и производству ЭКБ для высоконадежных применений возможно построить кооперационную схему, где разработка и финальные операции сборки и испытаний остаются за российским производителем, а кристалльное производство осуществляется либо на российских фабриках, либо за рубежом (рис.7). Определенные шаги в этом направлении предпринимает Отраслевой центр проектирования специализированных СБИС при ОАО "Российские космические системы", созданный для обеспечения потребностей предприятий Роскосмоса в специализированных СБИС. Однако конкретные подходы к проектированию СБИС для РКТ, используемые специалистами этой компании, мы рассмотрим в следующей статье.

Конечно, в рамках одной статьи практически невозможно охватить все аспекты проектирования и производства специализированной ЭКБ для аппаратуры РКТ. За рамками статьи остались вопросы проектирования аналоговых схем, авторы намеренно не делали акцент на проведении испытаний и вопросах комплектования аппаратуры. Не рассмотрены маршруты проектирования и нормативная документация – это предмет отдельного обсуждения. Авторы считают, что начатая журналом дискуссия крайне важна для развития отечественной космической отрасли и будут благодарны за отклики, которые просим направлять e-mail: steshenko@steshenko.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басаев А., Гришин В. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №8.
2. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением – взболтать. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №7.
3. Стешенко В. и др. Проектирование СБИС типа

"Система на кристалле". Маршрут проектирования. Синтез схемы. – Электронные компоненты, 2009, №1.

4. Стешенко В.Б. и др. Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер. – Компоненты и технологии, 2008, № 9.
5. Бухтеев А.А. Методы и средства проектирования систем на кристалле. – Chip news, 2003, №4, с. 4–14.
6. Н.С.Koons et al. The impact of the space environment on space systems. – Technical Report, AD-A376872; TR-99(1670)-1; SMC-TR-00-10 EL Segundo Technical Operations.
7. Кобзарь Д. Процедурные вопросы применения электронных средств в военной технике: нормативная база и правда жизни. – Современные технологии автоматизации, 2007, №3, с. 86–97.
8. Lacroe R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies. – 2003 IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial technologies: How design scaling has affected the selection of space borne electronics. July 2003, 2003 Monterey. California, p. II-1–II-142.
9. Oldham T.R. How device scaling affects single event effects sensitivity. – Там же, p. IV-I-IV-66.
10. Руткевич А., Стешенко В., Шишкин Г. Самосинхронная электроника: направления развития. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №8.
11. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004.
12. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. – М.: Радио и связь, 1994.
13. Ionizing radiation effects in MOS devices & circuits./Ed. by Ma T.P. and Dressendorfer P.V. – John Wiley and Sons, 1989.
14. Жан М. Рабаи, Ананта Чандракасан, Боривож Николич. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. Изд. 2. – М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2007.
15. Казённов Г.Г, Перминов В.Н и др. Системы схемотехнического моделирования AVOCAD. Проектирование аналого-цифровых систем на кристалле. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 5.
16. Перминов В.Н и др. AVOCAD + САПР СБИС компаний CADENCE и SYNOPSIS. Интеграция на основе технологии многоязыковых трансляторов и объектных баз данных. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 4.
17. Кокин С.А, Перминов В.Н, Макаров С.А. Современные технологии схемотехнического моделирования. Система AVOSpice компании ООО "UniquelCs". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №5.