

радиоэлектроники

**Управление техническим
уровнем
высокоинтегрированных
электронных систем**

(научно–технологические
проблемы и аспекты развития)

Под ред. П. Мальцева



ТЕХНОСФЕРА

УДК 621.3

ББК 32.85

К63

К63 Комаров А.С., Крапухин Д.В., Шульгин Е.И.

Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем (научно-технологические проблемы и аспекты развития) / Под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 240 с. ISBN 978-5-94836-397-4

В монографии представлены результаты исследований и разработок по реализации «Основ политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 г. и дальнейшую перспективу», утвержденным президентом Российской Федерации.

Сформулированы основные принципы и методы управления техническим уровнем при реализации системной организации по проектированию, моделированию и технологическому обеспечению изготовления СБИС типа «система на кристалле», разработана концепция построения инфраструктуры сквозного проектирования сложно-функциональных СБИС от системного уровня до топологии кристалла, выбора технологического базиса для изготовления СБИС с учетом обеспечения специальных требований по радиационной стойкости, организации процесса изготовления фотошаблонов и микросхем, последующего их тестирования, сборки, испытаний и применения.

УДК 621.3

ББК 32.85

© ИСВЧПЭ РАН, 2014

© ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2014

ISBN 978-5-94836-397-4

Содержание

Список условных сокращений.....	8
Введение.....	10
Глава 1. Исследование направлений и путей развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники, проектирование РЭА на основе СБИС типа «система на кристалле».....	35
1.1. Исследования направлений и путей развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники, их функционального состава и характеристик.....	37
1.2. Особенности конструирования СБИС типа «система на кристалле», основные проектные платформы СБИС типа «система на кристалле».....	38
1.2.1. Процессорные ядра и СФ-блоки многократного использования.....	47
1.2.2. СБИС типа «система на кристалле» на базе реконфигурируемых структур.....	49
1.2.3. Встраиваемые программируемые логические ядра.....	58
1.2.4. Аналоговые функциональные блоки и блоки со смешанной обработкой сигнала для СБИС типа «система на кристалле».....	58
1.2.5. СФ-блоки цифровых приемников/передатчиков типа «система на кристалле».....	58
Выводы к главе 1.....	59
Глава 2. Разработка и обеспечение реализации научно-методических принципов управления научно-техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем.....	65
2.1. Системный анализ физико-технологических ограничений реализации развития технического уровня сложнофункциональных микроэлектронных систем.....	67
2.2. Анализ функциональной полноты и достаточности разрабатываемых и планируемых к разработке СФ-блоков для проектируемых СнК в обеспечение РЭА.....	71
2.2.1. Структурные решения СБИС типа «система на кристалле», направления их развития и опыт реализации.....	73
2.2.2. Определение степени применимости СФ-блоков.....	88
2.3. Оценка достаточности действующей НТД по разработке и производству СБИС типа СнК с использованием СФ-блоков.....	94
2.3.1. Направления перспективных работ по созданию нормативных документов по СФ-блокам и СБИС типа СнК в интересах РЭА.....	101

2.4. Организация разработки СБИС типа «система на кристалле» на основе СФ-блоков.....	104
2.4.1. Инфраструктура разработки СБИС типа СнК.....	107
2.4.2. Основные методические этапы по развитию инфраструктуры проектирования СФ-блоков и СнК.....	114
2.4.3. Современные подходы к проектированию СБИС с топологическими нормами 0,18—0,25 мкм и последующим переходом в нанометровые области.....	116
2.5. Применение статистического метода для анализа и прогнозирования развития проектно-технологического базиса сложнофункциональных СБИС.....	125
Выводы к главе 2.....	133
Глава 3. Формирование унифицированной номенклатуры СФ-блоков по технологии КМОП/КНС для создания радиационно-стойких СБИС типа «система на кристалле».....	136
3.1. Анализ направлений и путей развития в области проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники типа СБИС «система на кристалле» на основе СФ-блоков, анализ проектно-технологических возможностей по их реализации.....	138
3.1.1. Исследование архитектурно-структурных решений СБИС типа СнК.....	143
3.2. Специальные требования к СФ-блокам СБИС типа «система на кристалле», предназначенным для работы в аппаратуре космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации.....	148
3.3. Тенденции развития СБИС для бортовой космической аппаратуры. Выбор и обоснование технологии, обеспечивающей изготовление СБИС типа «система на кристалле» для космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации.....	152
Выводы к главе 3.....	159
Глава 4. Исследования по созданию технологии производства структур с ультратонкими слоями кремния на сапфире.....	162
4.1. Анализ современного состояния технологий производства КНС структур с ультратонким эпитаксиальным слоем кремния и КМОП- микросхем на основе КНС структур с ультратонким слоем кремния.....	163
4.2. Создание СБИС, в том числе типа «система на кристалле», и СФ-блоков для них по технологии КМОП/КНС аппаратуры управления ракетно-космической техники и автоматики специального назначения.....	175

4.3. Разработка и создание технологии КНС структур с ультратонкими слоями кремния и проектных решений для реализации КМОП/КНС СБИС на их основе.....	176
Выводы к главе 4.....	178
Заключение.....	182
Литература.....	190
Приложение А (Справочно-аналитическое). Научно-методические рекомендации (аннотировано). Исследование и разработка методов физико-технического и нормативно-методического контроля технического уровня СБИС с предельными топологическими нормами.....	199
Приложение Б. Информационная среда проектирования. Методические рекомендации. Состав и основное содержание разделов справочно-информационного листа для описания СФ-блоков на различных этапах интеграции в СБИС и требования к содержанию заявки на разработку СБИС типа «система на кристалле».....	206
Приложение В (аннотировано). Информационная среда проектирования. Методические рекомендации по правилам заказа на изготовление СБИС в режиме Foundry.....	237

ГЛАВА I

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ И ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ СЛОЖНО- ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЭА НА ОСНОВЕ СБИС ТИПА «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ»

Тактико-технические характеристики ВВТ непосредственно зависят от технического уровня применяемой в них ЭКБ, прежде всего сложнофункциональных изделий микроэлектроники межвидового применения.

В отсутствие высокосложных отечественных микросхем аппаратурные предприятия оказались перед необходимостью применения в РЭА микросхем зарубежного производства, использованию которых в РЭА в настоящее время имеется альтернатива [3, 4].

Проведенный анализ конструирования радиоэлектронных систем за рубежом показывает, что с конца 90-х годов в проектировании электронной компонентной базы активное участие начали принимать аппаратурные фирмы-разработчики. Это объясняется тем, что мировой технологический уровень производства электронных компонентов позволяет создавать на одном кристалле до 40 млн транзисторов для логических схем и 500 млн транзисторов для схем памяти. Такой технологический уровень производства создал условия для проектирования СБИС типа «система на кристалле». В качестве составных частей таких СБИС используются СФ-блоки, разработанные путем оптимизации схемотехнических решений наиболее часто повторяющихся узлов и блоков в различных типах радиоэлектронных систем. Существующий в настоящее время за рубежом каталог СФ-блоков для широкомасштабного перехода на новые принципы конструирования радиоэлектронной аппаратуры, и в первую очередь систем вооружения и военной техники, содержит более 2000 наименований.

Основные отличия технологии СнК от технологий проектирования прошлых лет заключаются не только в функциональной и технологической сложности создаваемых микросхем, а в принципиально новой архитектуре таких схем — на-

личии на кристалле программируемого ядра, и даже не одного, а, как правило, двух и более. Такое построение кристалла диктуется системными требованиями по применению. В любой реальной системе, как правило, необходимо выполнять универсальные функции управления, которые возлагаются на микроконтроллер на основе RISC-процессора и обработку сигналов различного уровня и с различными критериями качества (производительность, точность, динамический диапазон, потребляемая мощность). Поэтому в составе СнК должны быть, как правило, RISC-микроконтроллер (RISC — Reduced Instruction Set Computer), процессор обработки сигналов (ЦПОС — цифровой процессор обработки сигналов или DSP — Digital Signal Processor), АЦП и ЦАП, схемы интерфейса, схемы встроенного контроля и диагностики и другие унифицированные СФ-блоки.

Наличие нескольких программируемых ядер со своими системами программирования резко увеличивает сложность технологии СнК по сравнению с методами проектирования прошлых лет. При этом необходимые и значительные затраты при создании СнК требуются не на этапе схемотехнического или топологического проектирования системы в целом, а на этапе разработки базовой библиотеки программируемых ядер, инструментального и программного обеспечения, а также интегральной верификации проектов.

Это означает, что невозможно создать в рамках финансирования НИР и ОКР по государственному оборонному заказу много программируемых ядер с различными и несовместимыми архитектурами, на что потребуются многие миллиарды рублей. Например, многолетние вложения фирмы Texas Instruments в создание платформы «ОМАР» составили несколько сотен миллионов долларов.

Для отечественной оборонной промышленности необходимо сконцентрировать как организационные, так и финансовые ресурсы на создании наиболее рациональной номенклатуры таких схем, покрывающих наибольшее число задач перспективных РЭА.

В отечественной практике пока не сложилась необходимая современная инфраструктура разработок СБИС повышенной степени сложности, не установлена отработанная методология проектирования СБИС на основе общего банка СФ-блоков. При разработке СБИС официально не используется интеллектуальный опыт предприятий по созданию отдельных макроблоков, проектирование в основном замыкается в коллективе одного предприятия при длительных сроках проектирования, отсутствуют доступные большинству разработчиков базовые лицензионные программные средства для современных САПР.

Инфраструктура должна включать новую методологию заказного проектирования СБИС, основанную на использовании повторно используемых библиотек микро- и макроблоков (СФ-блоков), существенное изменение содержания взаимодействия различных предприятий (аппаратурных, Центров проектирования СБИС, «кремниевых мастерских», предприятий и отдельных специалистов, об-

ладающих интеллектуальной собственностью на СФ-блоки), участвующих в процессе создания СБИС.

Важнейшую позицию в методологии должны составлять организационно-технические мероприятия по аттестации маршрута разработок СБИС, выполняемых коллективами различных предприятий, а также оформления и аттестации используемых при разработках СБИС СФ-блоков различных предприятий.

Ускоренное развитие инфраструктуры разработки аппаратурно-ориентированных сложнофункциональных изделий микроэлектроники типа «система на кристалле», развертывание работ по их проектированию и внедрению для обеспечения тактико-технических требований перспективных РЭА, планируемых к созданию в рамках программы вооружений до 2020 года, является важнейшей задачей отечественной промышленности.

Обмен опытом создания и применения СнК в РЭА позволяет провести унификацию таких схем и резко уменьшить затраты на создание, эксплуатацию военной техники и принципиально решить проблему импортозамещения.

1.1. Исследования направлений и путей развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники, их функционального состава и характеристик

В настоящее время неуклонно продолжается рост требований к вычислительной мощности и объему памяти аппаратуры различного назначения и областей применения. Это сопровождается увеличением степени пространственного и временного разрешения и увеличением использования имитационного моделирования, а также стремлением осуществлять оптимизацию научных и коммерческих проблем в реальном времени.

Среднегодовой прирост быстродействия схем составляет 80%. В последующие несколько лет этот прирост может составить 90—100%.

Это налагает повышенные требования к полупроводниковой технологии, схемотехнике и системотехнике. Анализ рабочей частоты микропроцессоров за последние десять лет и прогнозируемых частот на последующие два-три года показал, что в будущем частота будет возрастать вдвое медленнее, чем в предыдущее десятилетие. Масштабирование позволяет переходить на меньшие топологические размеры, но все большим ограничивающим фактором выступает потребляемая мощность. Поэтому быстродействие схемы на кристалле становится результатом интеграции функций на кристалле (создание системы на кристалле, а не масштабирования частоты).

Последнее десятилетие стало годами массового промышленного освоения полупроводниковой нанотехнологии — выпуска СБИС с проектными нормами 180—90—65—45 нм. Это позволяет размещать на кристалле сотни миллионов транзисторов, из которых формируются усовершенствованные системы. Эти системы включают цифровые, аналоговые и ВЧ компоненты. Была установлена эффективность реализации схем с несколькими процессорными ядрами [30, 43, 48].

Если проанализировать мировой рынок полупроводниковых СФ-блоков, то можно сделать вывод: среднегодовой прирост мирового рынка полупроводниковых СФ-блоков, состоящий из доходов от продаж лицензий на изготовление этих изделий, составляет 10,6%, что превышает темп роста всего полупроводникового рынка, сектора цифровых ядер, включающего специализированные СБИС и программируемые СБИС, а также сектора специализированных стандартных СБИС.

По данным фирмы iSuppli Corp., рынок полупроводниковых СФ-блоков составляет более 2 млрд долларов. Каждое новое поколение полупроводниковой технологии увеличивает необходимость использования СФ-блоков как составной части стандартной методики конструирования.

В долгосрочном плане рост рынка полупроводниковых СФ-блоков, стимулируемый ростом степени интеграции и функциональной сложности, будет больше тесно связан с ростом продаж полупроводниковых изделий, в особенности кремниевых ядер, а не с ростом числа новых конструкций.

Главной особенностью рынка полупроводниковых СФ-блоков является взрывной рост доли аналоговых СФ-блоков и СФ-блоков для обработки смешанного сигнала [14]. Их годовой рост составил 39%.

1.2. Особенности конструирования СБИС типа «система на кристалле», основные проектные платформы СБИС типа «система на кристалле»

Имеются пять главных проблем при создании современной конструкции СБИС типа СнК. Первая проблема связана со сложностью функционального содержания функциональных блоков, содержащихся в типовой системе. Объем этого содержания приводит к распространенному восприятию, что конструирование таких систем со старта выходит за пределы возможностей даже самых крупных конструкторских коллективов. Некоторые виды СФ-блоков многократного использования становятся неотъемлемой частью конструкции СнК.

Большая часть функциональных возможностей систем на базе СнК реализуется программным способом, а необходимость увеличения производительности и многократного использования решается программными и аппаратными средствами. Наряду с увеличенным многократным использованием СФ-блоков, это

приводит к необходимости конструирования на более высоких уровнях абстракции и к переходу от написанных спецификаций к «исполняемым» спецификациям, часто на языках С или С++.

Вторая проблема — архитектурная. Если функциональная сложность такого масштаба реализуется в короткий период времени, с самого начала реализации проекта должен иметься детализованный набор архитектур, строго приспособленный для реализации производительности.

Прошли времена, когда различные функциональные блоки могли быть распределены между членами конструкторского коллектива, которые имели относительное автономное решение архитектуры для этого блока. Конечно, всегда имеются некоторые унифицированные архитектурные решения — быстродействие процессора, ширина шины для обеспечения необходимого быстродействия и, возможно, объем памяти.

Две указанные проблемы касаются системного уровня конструирования СнК.

Проблема верификации является третьей проблемой, вытекающей из первой, — невозможно реализовать широкие функциональные возможности и чрезвычайно трудно их интегрировать и проконтролировать. Эта проблема усугубляется двумя факторами. Многократное использование СФ-блоков не решает проблемы, так как СФ-блок должен быть проверен в контексте системы. И аппаратно-программная интеграция запаздывает по циклу конструирования и становится непомерно затруднительной, так как здесь часто невозможно получить годный образец до изготовления СнК. Ведущие конструкторские коллективы ищут различные способы улучшения верификации.

Существует тенденция реализации системной интеграции на «виртуальном» образце, при которой используется модель имитационного моделирования для сведения аппаратных и программных средств вместе по возможности на самой ранней стадии. Проблема заключается в определении, когда завершается использование программных средств и начинается системная интеграция. На практике это большая серая область, которая охватывает большую часть разворачиваемых программно-аппаратных средств, особенно развития аппаратного слоя абстракции (Hardware Abstraction Layer, HAL).

Это приводит к четвертой проблеме и, возможно, самому большому препятствию: сложность взаимодействия и связей коллектива конструкторов для успешной реализации конструкции СнК. Для успешного решения первых трех проблем необходимо наладить взаимодействие между системными архитекторами, конструкторами алгоритма, разработчиками программных и аппаратных средств, системными интеграторами и специалистами по верификации. Эти организационные функции редко интегрируются вместе. Очень часто существуют значительные организационные, а иногда физические разделения между этими функциями, и реальная кооперация является исключением, а не нормой.

Наконец, пятую проблему, вернее комплекс проблем, составляют задачи, которые связаны с реализацией сложной конструкции с использованием технологии изготовления распределенных систем. Эти проблемы включают синхронизацию, размещение и маршрутизацию, в том числе устранение таких физических эффектов, как перекрестные помехи. Эти проблемы решаются средствами САПР, ориентированными с потоками от RTL до GDSII, которые являются составной частью процесса проектирования СнК.

Методология проектирования должна представлять собою гибкое и эффективное конструирование электронных изделий на системном уровне. Такая методология может быть использована системными архитекторами, конструкторами алгоритмов, разработчиками программных средств, конструкторами аппаратных средств, системными интеграторами и специалистами по верификации и рассматривается как единый процесс конструирования с многочисленными входами и выходами. Имеется также возможность включения СФ-блоков и других конструктивных элементов разных фирм. Главный поток должен быть по типу конструирования сверху-вниз или конструкции на базе платформ, который включает значительную часть конструирования по принципу снизу-вверх, по крайней мере, на этапе создания платформы.

На практике реальные потоки конструкций являются комбинацией, зависящей от имеющихся в распоряжении конструкций.

Методология конструирования лучше понимается при рассмотрении подхода сверху-вниз. Этапы методологии включают спецификации, архитектуру и реализацию с различными уровнями верификации, выполняемыми параллельно.

Функциональная система формируется из серии блоков, которые могут быть смоделированы, выдавая функциональное поведение системы для последующих верификации, отладки и анализа. По завершении может быть выполнено разбиение, определяя назначение блоков по программе целевого процессора, который образует внешнюю системную модель или испытательный стенд. Такой конструктивный поток автоматически генерирует всю необходимую связующую логику и программные драйверы для реализации архитектуры, отвечающей выбранному аппаратно-программному разбиению.

Как программные, так и аппаратные блоки могут быть в дальнейшем уточнены для реализации и могут быть повторно смоделированы на любом этапе уточнения. На всем протяжении процесса для системных архитекторов, конструкторов аппаратных средств и разработчиков программного обеспечения должен быть представлен полный набор инструментальных средств для отладки и анализа. Аналитические инструментальные средства могут быть использованы для исследования архитектурных проблем, таких как аппаратно-программное разбиение, выбор процессора, шинной архитектуры и т. д.

После уточнения программные средства могут быть экспортированы в виде целевой программы, компилированной на целевой процессор и проверенной в системе. Аппаратные средства могут быть экспортированы в виде синтезированного RTL в аппаратное описание на языке VHDL или Verilog.

Данная методология, рассматривающая как аппаратные, так и программные средства, должна быть гибкой, использовать многочисленные тракты и входы/выходы, обеспечивая единый и согласующийся подход к конструированию между разработчиками систем, аппаратных и программных средств. Должны использоваться два варианта потоков или с конструкцией по типу сверху-вниз, или с конструкцией на базе платформы.

Известно, что в состав СФ-блоков входят микропроцессоры типа ARM, МСФ-S, микроконтроллеры, сигнальные процессоры, графические и мультимедийные процессоры и память большой емкости. Обычно память реализуется не в виде одного встроенного блока большой емкости, а в виде большого количества СФ-блоков небольшой емкости.

По зарубежным данным (фирма International Business Strategies Inc., IBS), среднее количество СФ-блоков, используемых в СнК увеличилось с менее чем 20 в 2001 году до 100 и более. Экстраполяция этой тенденции показывает, что среднее количество СФ-блоков достигнет 400, 600 и более. Площадь СФ-блоков занимает более 50 % площади кристалла и ожидается, что достигнет более 70 %.

Следует отметить, что скорость увеличения количества СФ-блоков превышает скорость увеличения площади кристалла. Это связано с очевидным ростом количества небольших СФ-блоков памяти по сравнению с более крупными СФ-блоками, например микропроцессорами.

Из данных, собранных на конференции по САПР, следует, что свыше 175 конструкторских коллективов подтвердили, что рост количества СФ-блоков недооценивается.

Максимальное количество СФ-блоков характерно для СнК, используемых преимущественно в коммутационных и связанных системах, преобладает использование СФ-блоков памяти по сравнению с традиционными процессорными СФ-блоками.

Вклад роста СФ-блоков более важен, чем это оценивают большинство специалистов. Фактически происходит переход от СБИС с «морем» элементов к СБИС с «морем» СФ-блоков и ряда блоков со стандартными элементами, соединенными между собой.

Вопреки этим изменениям, размещение СФ-блоков до недавнего времени рассматривалась как проблема, не зависящая от размещения и маршрутизации стандартных элементов. По сути же дела, процесс конструирования становится ориентированным на СФ-блоки. Ввиду увеличения количества СФ-блоков и площади для них становится невозможным зафиксировать конструкцию и оптималь-

ный размер кристалла через оптимизацию в ходе реализации. Плохая общая топологическая структура не может быть исправлена в процессе реализации, если половину площади занимают СФ-блоки.

Поскольку СФ-блоки располагаются до и независимо от стандартных элементов, для связи между ними создается сложная сеть межсоединений. Результат вполне знаком большинству конструкторов: большое количество проводников проходит через конструкцию и имеет место высокое переполнение, так как все стандартные ячейки располагаются в местах, близких к СФ-блокам. Следствием является то, что высокоплотная сеть соединений стандартных элементов распространяется по всей ИС, внося вклад в увеличение длины проводников и в переполнение. В таких ИС резко падает степень использования, так как конструкторы имеют дело с высоким переполнением. Фактически очень низкая степень использования многих недавно разработанных СнК, сконструированных с использованием новых технологий, замедляет освоение таких технологий. Хотя это явление до сего времени недостаточно изучено, вывод логичен: к пониженному использованию приводит увеличенный размер кристалла.

С повышением количества СФ-блоков в СнК пропадает необходимость размещения их вручную. Хотя большинство опытных конструкторов обычно хорошо понимают поток данных в своей конструкции и логическое размещение своих СФ-блоков, это не может быть выполнено, если количество СФ-блоков превышает 100. В дополнение к размещению СФ-блоков, их ориентация и возможные переключения состояния предполагает экспоненциальное количество решений. Проблем даже больше, если представить себе, что большинство СФ-блоков встроенной памяти имеет множество аспектных отношений и многочисленные расположения выводов. Учитывая критическую природу СФ-блоков в общем диапазоне использования и размер кристалла, очевидно, что необходима автоматизация процесса конструирования, так как объем данных слишком велик, чтобы с ним мог справиться человек.

Кроме того, располагая последними достижениями в области синтеза высокого уровня и возможностями совместного конструирования аппаратных и программных средств, инженеры имеют возможность и желание быстро исследовать многочисленные архитектуры высокого уровня. Инструментальные средства высокого уровня дают возможность оптимального выбора архитектур, исходя из различных комбинаций доступа к памяти, распределения ресурсов и мультиплексирования.

Но без понимания влияния многочисленных решений на размер кристалла конструкторы будут осуществлять выбор компромиссного решения вслепую. Например, может быть принято решение распределять значительные ресурсы между двумя различными частями системы. Хотя при высоком уровне абстракции экономия площади является очевидной, это распределение может привести к такому

типу концентрации межсоединений, вызывая резкое переполнение, делая это решение непривлекательным.

Возможность исследования архитектур на высоком уровне обеспечивает точное рассмотрение многочисленных решений, основанных на различных СФ-блоках, различных местах, ориентациях и аспектных отношениях.

Как известно, чем больше кристалл, тем дороже СБИС, причем эта зависимость не линейная, а скорее квадратичная. Уменьшение степени использования и увеличение размера кристалла и влияние этого на стоимость были исследованы на полупроводниковом заводе при использовании 0,13-мкм проектных норм согласно табл. 1.1.

Таблица 1.1. Влияние на стоимость кристалла уменьшения степени использования и увеличения размера кристалла

	Размер кристалла, мм ²	30	60	90	120
	Стоимость кристалла, долл.	3,50	8,50	15,40	24,70
Уменьшение используемой площади, %	5	6,0	6,8	7,6	8,4
	10	11,7	13,4	14,9	16,3
	15	17,6	19,7	21,8	23,8

Отмечается, что лишь при 10% уменьшении используемой площади кристалла в СБИС, состоящей из 3 млн компонентов, разница между себестоимостью и продажной ценой увеличивается более чем на 6 млн долларов.

В случае моря СФ-блоков наиболее важными факторами, влияющими на конструкцию, являются:

- способность выбрать из большого количества гибких реализаций СФ-блоков те, которые имеют акцент на широкое использование компиляторов памяти;
- способность размещения аппаратных СФ-блоков на кристалле таким образом, чтобы переполнение было сведено к минимуму и было обеспечено максимальное использование площади, обеспечивая наименьший размер кристалла.

Эти два важнейших параметра СБИС обеспечат впоследствии процесс синтеза с наибольшей эффективностью, а также размещение стандартных элементов и маршрутизацию. Эти параметры будут продолжать оказывать влияние на цикл конструирования через использование конструкций с более высоким уровнем абстракции, используя методологии СФ-блоков и СнК, поддерживая экономическую эффективность, которая необходима для продолжения освоения новых технологий.

Каждая новая узловая точка полупроводниковой технологии обеспечивает дальнейшую миниатюризацию и более высокие значения характеристик, тем самым увеличивая функциональные возможности схем. Добавление новых функций выгодно конечному пользователю, однако использование технологических процессов, обеспечивающих более мелкие и плотные структуры, приводит к тому, что схемы становятся более восприимчивы к дефектам. В настоящее время нанометровые технологии достигают уровня дефектности, который приводит к снижению выхода годных и надежности и, следовательно, увеличению периода освоения производства и времени достижения массового выпуска. Факторы, влияющие на процесс изготовления и время до освоения массового выпуска очень критичны для полупроводниковой промышленности.

Для того чтобы оптимизировать выход годных и достичь приемлемых сроков массового выпуска, необходимо в полупроводниковой промышленности осуществить усовершенствованную оптимизацию производства. Эти решения по оптимизации необходимо реализовать на различных фазах технологического процесса. Для этого недостаточно использовать обычную инфраструктуру полупроводникового производства. Необходимо учитывать инфраструктуру на кристалле.

Для оптимизации технологичности осуществляется внедрение набора сложных функциональных блоков, получивших название инфраструктурных СФ-блоков. Они включаются в конструкцию ИС и используются во время различных фаз реализации изделия. Большинство из известных СФ-блоков являются функциональными, например встроенный процессор, ЗУ, аналоговые или ВМПП ядра. Инфраструктурные СФ-блоки не являются функциональными. Они встраиваются в ИС исключительно в целях обеспечения технологичности и надежности. Их роль подобна элементам инфраструктуры здания, например электропроводки и водопровода, которые не зависят от эксплуатации здания. Инфраструктурные СФ-блоки могут быть использованы для мониторинга процесса, ремонта и тестирования, диагностики и отладки, синхронизации и отказоустойчивости с демонстрацией их эффективности для улучшения выхода и надежности. В частности, инфраструктурный СФ-блок был использован для измерения дрожания синхронизирующих импульсов на кристалле.

В полупроводниковой промышленности вот уже несколько лет пытаются дать определение слову «платформа». Но каждый поставщик инструментальных средств полупроводниковым заводам дает свое определение. Что касается платформ СнК, то они могут быть разделены на две основные категории: общие и специализированные. В общих платформах СнК должны содержаться, как минимум, процессорное ядро, контроллер памяти, универсальный асинхронный приемопередатчик, таймер, схема обеспечения безопасности, контроллер ЖКД и универсальные средства ввода/вывода с надлежащей шинной архитектурой для связыва-

ния всех элементов между собой, нечто вроде платформы PrimeXsys на базе шины AMBA фирмы ARM.

Примером отечественной платформы является платформа «Мультикор» [29, 37, 63].

Специализированные платформы содержат большинство изделий из вышеуказанного перечня плюс предварительно интегрированные СФ-блоки для данного приложения. Например, платформа Parthus Bluesteam содержит широкополосный контроллер Bluetooth и программный стек. Таким образом, платформы Greenlite и Linuxpak содержат все СФ-блоки и программное обеспечение, необходимые для построения однокристалльного мобильного задающего контроллера и однокристалльного Linux сервера соответственно.

Примерами отечественных специализированных платформ являются перспективные платформы для телекоммуникационных приложений, мультимедиа и цифрового телерадиовещания на базе телекоммуникационного процессора «Мультиком» [37], а также платформа для космических применений на базе специальной стойкой библиотеки.

Включение платформ СнК в методологию конструирования имеет несколько преимуществ. Уменьшится риск интеграции, поскольку все СФ-блоки работают вместе, уменьшится время на лицензирование и на составление контракта, поскольку платформа ограничивается одной лицензией, и значительно уменьшится стоимость благодаря повторному использованию содержимого платформы в многочисленных последующих конструкциях.

Важным преимуществом СнК платформ является функциональная изоляция. Компоненты могут быть изолированы друг от друга и проверены. Сама платформа может быть также изолирована от своих компонентов и проверена независимо. Использование платформ помогает вводу конструкции в различные изделия ввиду встроенной гибкости. При этом требуется минимальный объем реконструирования и меньший объем повторной верификации. Если конструкторский коллектив не имеет ресурсов, времени, кадров для разработки гибкой платформы, он может приобрести необходимый СФ-блок у сторонней фирмы. Например, платформы AsigX фирмы Palmchip и PrimeXSys фирмы ARM предварительно проверены и включают испытательный стенд и набор измерительных средств. Эти платформы могут предоставлять дополнительные преимущества. Например, платформа AsigX включает поддержку различных процессоров, является конфигурируемой и ускоряет синхронизацию.

Существует оценка, что в ближайшем будущем каждая конструкция СнК будет состоять от 10 до 15 различных СФ-блоков от 6—8 поставщиков. Для каждого СФ-поставщика понадобится 6—8 недель для оценки, переговоров и интеграции СФ-блока в систему. Это означает, что при поставках заказчику СФ-блоков от восьми поставщиков затраты выльются в скрытые издержки в 64 недели.

Если же, например, накладные расходы составят 10 000 долл. в неделю (технические и правовые вопросы, управление), это означает дополнительную стоимость в 640 000 долл. до сборки СФ-блока на кристалл. В эту стоимость не входит действующее СФ-лицензирование и не включена стоимость верификации, что все СФ-блоки полностью функционируют в системе. Стоимость только одной верификации может достичь 800 000 долл. Помимо этого, риск не уменьшается, поскольку конструкция не проверена в кремнии.

Можно представить все риски и проблемы разработки СнК без использования платформы.

Платформа решает проблемы стоимости и времени, а также уменьшает риск. Так как компании, занятые СнК, обеспечивают предварительно интегрированные и проверенные платформы, заказчикам необходимо подписать только одно лицензионное соглашение, осуществлять только одну оплату роялти и они смогут сэкономить 1,4 млн долл. скрытых издержек.

Платформа СнК является «пробивной» технологией, которая может сократить цикл конструирования на 10—12 месяцев. Оценивается, что стоимость конструирования СнК с чистого листа бумаги без использования платформ составляет 4,5 млн долл. Не вызывает сомнения, что снижение цикла конструирования на срок до 12 месяцев резко уменьшит стоимость разработки.

Как и в случае инструментальных средств САПР, коэффициент окупаемости инвестиций в платформы СнК быстро становится очевидным и реализация методологии платформ при конструировании представляется конкурентоспособным решением.

При работе с СнК платформами имеются определенные ограничения, связанные со случаями, когда требуются интенсивные модификации или когда чрезмерные усилия по обеспечению конфигурируемости. Сюда могут относиться максимальная и минимальная ширина шины на кристалле, отображение системной памяти, максимальные размеры кристалла и частота, системная задержка.

Перед конструкторами всегда стоит главная задача уменьшения времени поставки изделия на рынок. Очевидно, с усложнением изделия решение этой задачи усложняется. Использование аппаратных и программных ядер будет оставаться важным. Платформы СнК будут играть важную роль. Без их использования будет невозможно проверить будущие конструкции СнК без потери производительности. Освоение методологии платформ приведет к созданию многих изделий с меньшими усилиями и большими шансами на успех. Существует оценка, что задержка поставки изделия на рынок на месяц приведет к потере 10% потенциальных доходов. Здесь на помощь приходит создание и использование ядер и СФ-блоков многократного использования.

Платформа «Мультикор» — это комплекс аппаратно-программных средств, предназначенных для проектирования сложных интегральных схем типа «система на кристалле» и реализации различных приложений на их основе (рис. 1.1).

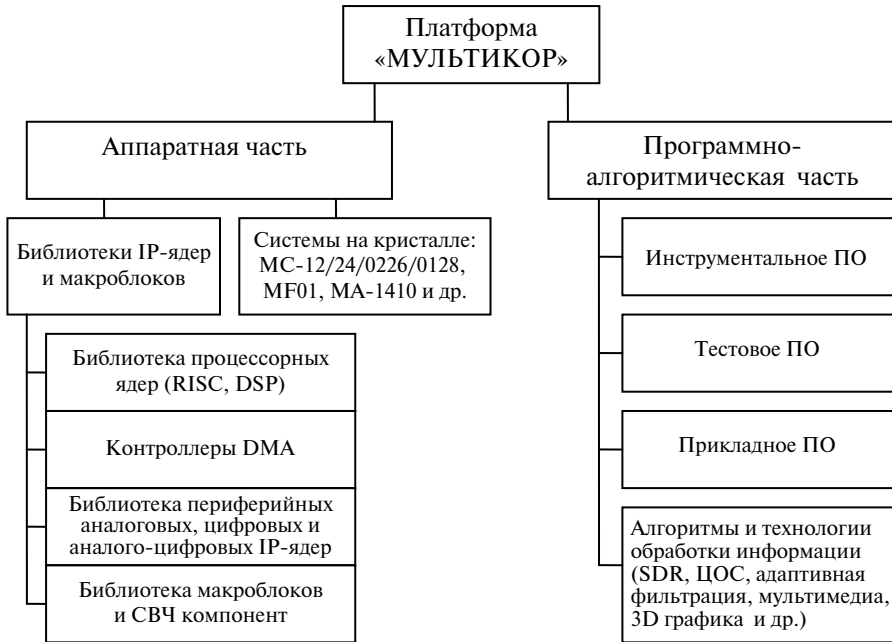


Рис. 1.1. Общая структура аппаратно-программной платформы «Мультикор»

Платформа состоит из аппаратной и программной частей.

Аппаратная часть включает в себя библиотеки IP-ядер и макроблоков, используемых при построении СнК. К ним относятся библиотеки процессорных ядер различных типов: RISC (Reduced Instruction Set Computer) и DSP (Digital Signal Processor), контроллеров DMA (Direct Memory Access), периферийных устройств, а также библиотека макроблоков и КМОП СВЧ компонент.

Программная часть платформы включает в себя инструментальное, тестовое и прикладное ПО, а также алгоритмы и технологии обработки информации. Инструментальное ПО, объединенное в интегрированную среду MCStudio™ [37], предназначено для разработки и отладки прикладных программ. Тестовое ПО используется для верификации СнК на этапе проектирования и контроля работоспособности готовых микросхем. Прикладное ПО, выполненное в виде библиотек прикладных функций, предназначено для реализации целевых функций конкретных прикладных систем.

1.2.1. Процессорные ядра и СФ-блоки многократного использования

Создание конструкций на ядрах и СФ-блоках многократного использования не является простой задачей. В частности, потребуются более тщательные проработка документации и описание характеристик, чем в обычном случае.

Основываясь на опыте инженеров-программистов, можно сделать вывод, что для подготовки компонентов многократного использования потребуются дополнительные усилия. Необходимо полное понимание, как компонент работает и как он должен интегрироваться с другими компонентами. Опять же, исходя из опыта инженеров-программистов, считается, что для создания второй конструкции требуется 30 % усилий от реализации первого варианта.

Информация, требуемая для документации на программный СФ-блок, даже более объемная, чем для исходного кода. В нее входят: функциональное описание, применения, характеристики интерфейса, информация об авторах и владельцах, информация о корпусировании, входные и выходные характеристики, инструментальные средства и используемые версии, полупроводниковые заводы (foundry) для изготовления ВМПП и специализированных ИС, размеры, данные измерений задержки и мощности, тестируемость, включая BIST, JTAG и SCAN.

Конструкции СнК могут включать разнообразные микропроцессорные ядра (например, с архитектурами ARM, МСФ-S, SPARC), PCI шинный интерфейс, аналоговые компоненты и многочисленные устройства для цифровой обработки сигнала. Конструкторы обращают все большее внимание на повторное использование ранее созданных конструкций для сокращения времени поставки изделий на рынок и в конечном счете для увеличения доходов.

Повторное использование ранее созданных конструкций осуществляется в течение десятилетий. На начальном этапе для повторного случая использовались простые библиотеки элементов, они используются и в настоящее время. В последние несколько лет основные функции реализуются с использованием виртуальных компонентов. Так как последние могут разрабатываться конструкторами разных фирм, то их повторное использование в новой конструкции связано с приложением усилий и определенным риском. Для сведения к минимуму указанных проблем некоторые организации осуществляют внутреннюю стандартизацию набора виртуальных компонентов и связанного с ними программного обеспечения для разработки своих собственных платформ СнК.

Конструирование на базе платформ обеспечивает организацию разработки законченных СнК. В случае полностью функционирующей платформы СнК в производных конструкциях виртуальные компоненты могут быстро добавляться или устраняться. Разработка законченных СнК с использованием десяти и более виртуальных компонентов в фиксированные предельные сроки является простой задачей. Конструкторы могут столкнуться с коммерческими и правовыми проблемами при создании виртуальных компонентов и установить факт неадекватности информации. Разработка платформ позволяет конструкторам преодолеть все указанные неопределенности без риска задержки изделия.

Следует отметить, что если вероятность правильности каждого компонента и межсоединений составляет 0,9, то вероятность корректности всей СнК состав-

вит лишь 0,5. Таким образом, должно быть затрачено длительное время на выполнение верификации для обеспечения первого успеха. С другой стороны, если все компоненты, исключая один новый, и их межсоединения проверены, то вероятность корректности всей СнК улучшится до 0,8. Понадобится гораздо меньше времени для верификации. Это служит серьезной мотивацией использования метода конструирования на базе ранее упомянутых платформ.

Кроме того, платформы СнК также обеспечивают разработчиков программного обеспечения «рабочим кремнием», который они могут использовать.

Платформы СнК могут быть поставлены заказчикам для демонстрации того, что может быть сделано, и даже предоставляется возможность заказчикам начать свои собственные разработки, используя существующие СнК. Всякий раз, когда заказчик определяет, что было бы желательно иметь производную конструкцию, специализированную под свои приборные нужды, конструкторы платформ СнК добавляют или удаляют некоторое число виртуальных компонентов и корректируют программное обеспечение. Производная конструкция может быть реализована менее чем за шесть месяцев от составления концепции до производства.

1.2.2. СБИС типа «система на кристалле» на базе реконфигурируемых структур

Реконфигурируемые конструкции СнК характеризуются двумя особенностями, которые отличают их прочих СнК конструкций. Во-первых, возможность изменения функциональных возможностей аппаратных средств простым изменением кода, который осуществляет инициализацию системы.

Вторая особенность является ответвлением первой. Реконфигурирование может осуществляться произвольное количество раз после того, как аппаратные средства инициализированы. Эта особенность используется в большом количестве применений. Например, мультимедийный плеер может сконфигурировать аппаратный кодек на потоки данных в формате MPEG1, MPEG2. Подобный метод может использоваться клиентами виртуальных частных сетей или в сервере, в котором могут использоваться различные методы кодирования, реализуемые аппаратным способом.

Должно реализовываться компромиссное соотношение по использованию стандартных реконфигурируемых СнК или заказных СнК с количеством поставляемых чипов и временем их поставки на рынок. Специализированные конструкции имеют обычно большие начальные затраты на конструирование, но низкую стоимость отдельных чипов. Начальные затраты на конструирование реконфигурируемых СнК относительно невелики, но чипы обычно более дорогие.

В основе любой платформы СнК находятся архитектурные компоненты, позволяющие реализовать инфраструктуру, в которой интегрируются процессоры, периферийные устройства и память, необходимые для обеспечения применения

СнК. Для реализации архитектуры на кристалле многократного использования необходимо использование СФ-блоков, которые часто состоят из таких компонентов, как контроллер памяти, контроллер прерывания, контроллер управления питанием, внутренняя память, мосты, кэш и др.

Все указанные компоненты обычно соответствуют спецификациям СнК, например блок контроллера внешней памяти, который играет главную роль для хранения данных и команд, буферизации и транспорта данных при любой архитектуре. Он должен конфигурироваться для поддержки памяти различных типов (синхронная, асинхронная), объемов, значений ширины, банков, пусковых адресов, методов пакетной передачи, регенерации и разрешения конфликтов при доступе к каналу. Такой блок оказывает значительное влияние на характеристики СнК и поэтому должен быть всегда специализирован на каждое применение СнК.

Но так как каждая конструкция СнК часто требует контроллера памяти с его собственными спецификациями, каждый проект обычно начинается с нуля или осуществляется значительная модификация базовых ядер. Это потребляет значительные ресурсы, но мало что вносит в общий проект. Решение проблемы видится в использовании реконфигурируемых СФ-блоков с текстовым или графическим интерфейсом, который конфигурирует блок в соответствии с заданными параметрами. Если требования к СнК меняются, то блок может быть реконфигурирован на соответствие новым требованиям. Это позволяет распределять ресурсы на аппаратные или программные при ускорении общего процесса конструирования.

Реконфигурируемые СФ-блоки имеют много преимуществ по сравнению с традиционными СФ-блоками многократного использования. Из них главным является гибкость реконфигурирования ядра. Использование гибких универсальных СФ-ядер или ядер с большими возможностями, чем было задано раньше, позволяет устранить недостатки традиционных СФ-блоков многократного использования. Однако такие ядра будут больше и потенциально медленнее, чем реконфигурируемые ядра. Например, контроллер конфигурируемой памяти будет содержать необходимые ресурсы для поддержки типов памяти и приборов, используемых в конструкции, но не будет поддерживать другие типы памяти и приборов. Это резко повлияет на общие размеры и быстродействие конструкции по сравнению с универсальными СФ-ядрами многократного использования, содержащими массу неиспользуемых возможностей. Реконфигурируемые СФ-блоки могут иметь много форм. Однако главными компонентами, которые всегда должны быть представлены, являются препроцессор для задания нужной конфигурации и сам СФ-блок. Препроцессор может представлять собой или отдельную программу с графическим интерфейсом (GUI) для обеспечения пользовательского выбора, или спецификатор шаблона файла с текстовым содержанием, который пользователь заполняет вручную.

Пользователь реконфигурируемых СФ-блоков должен иметь возможность многократного задания требований, пока не будет получен удовлетворительный результат методом проб и ошибок. Сам по себе СФ-блок также имеет много форм исполнения. Он может представлять собой полное расширенное описание всех возможных вариантов выбора, которые использует конструкция компилятора (такие, например, как в ПО Verilog) для выбора нужной конфигурации, основанной на файле конфигурации, подготовленном препроцессором. Это выполняется хорошо, если дополнительные процессы, такие как синтез и формирование топологии, должны выполняться на СФ-блоке до того, как он представлен заказчику. Тем не менее, будучи поставленными заказчику, такие СФ-блоки трудны для понимания и также существует тот недостаток, что открывается полное реконфигурированное содержание системы для любого заказчика.

Другой крайностью является генерирование уникального кода для каждой конфигурации. Это может осуществляться посредством удаления неиспользуемого кода из полной версии СФ-блока или посредством использования инструментальных средств предварительной обработки, таких как инструментальные средства со свободными программными средствами (VPP — Verilog Pre-Processor), или специализированных инструментальных средств для генерированного кода из описания более компактного, конфигурируемого кода. Возможны также промежуточные варианты, как, например, генерирование специфичного кода конфигурации для большинства реконфигурируемых вариантов, допускающие пользователю изменять определенные варианты конфигурации без повторения всего процесса конфигурации. Например, для контроллера реконфигурируемой памяти это возможность изменять объем отдельной памяти.

В реконфигурируемых платформах СнК совмещаются достоинства платформ СнК и реконфигурирования. В конструкции на базе платформы основная часть СнК специализированной СБИС может являться базовой аппаратной платформой, которая может быть превращена в нужную прикладную конструкцию. Так, контроллер накопителя на жестком диске (HDD), по сути, представляет собой контроллер СнК, выполняющий все цифровые функции, исключая контроль двигателя. Он включает АТА интерфейс, устройство кода корректировки ошибок, форматтер диска, управление памятью, программируемое ОЗУ и поддерживает внешний код и буферную память.

Базовая платформа может быть затем персонифицирована в процессор посредством преобразования в специализированный процессорный мост. Пользователь интегрирует специализированный контроллер серводвигателя и двигателя для завершения построения настольного контроллера накопителя жестких дисков. Использование интерфейсного блока РСМСІА позволяет создать аналог контроллера диска для портативного компьютера. Использование интерфейса АТА-АТАРІ, интерфейса НГМД, форматтера дисков и серводвигателя позволяет

создать контроллер сменных дисков. Базовая конструкция платформы микроконтроллера может применяться во многих областях.

Совмещая концепцию СФ-блока с реконфигурируемой архитектурой и с базовой платформой, можно представить дальнейшее развитие реконфигурируемых платформ. Например, на базе платформы универсального контроллера может быть реализовано устройство посредством присоединения порта IEEE 1284 и ядра 10/100 Ethernet MAC и двух контроллеров интерфейса DMA сервер-базового принтера. Дальнейшим шагом может быть использование двух портов IEEE 284 для работы в качестве концентратора, поддерживающего работу двух принтеров в одном сетевом порту. Для этого требуется не только добавление ядер В/В, но и некоторые изменения в архитектурных СФ-блоках. Контроллер прерывания понадобится для выполнения дополнительных прерываний процессора, контроллер памяти необходим для изменения интерфейса с дополнительными банками и увеличения быстродействия памяти и контроллер процессорного интерфейса необходим для дополнительной поддержки конфигурации и контроля дополнительных ядер ввода/вывода. Использование реконфигурируемой базовой платформы обеспечивает конфигурацию указанных компонентов с дальнейшим уменьшением на конструирование при построении дополнительных производных конструкций.

Реконфигурируемые СнК платформы отличаются от реконфигурируемых СФ-блоков тем, что поставляемая пользователем логика должна быть интегрирована в них, а не располагаться вокруг. Представляется, что это приведет к уменьшению гибкости реконфигурируемых СФ-блоков, так как СФ-блоки пользователя должны быть повторно интегрированы на платформу всякий раз при построении новой конфигурации платформы. Тем не менее необходимость переконструирования интерфейса к СФ-блоку пользователя для каждой конфигурации может быть устранена посредством использования гибкой конструкции платформы СнК на базе каналов, описанной выше. Это осуществляется посредством конструирования двунаправленного канала, который воспринимает пользовательский СФ-блок и выполняет все необходимые задачи при работе с каналом. Этот двунаправленный канал может повторно использоваться, если требуется применить предлагаемый интерфейсный стандарт VSIA на СФ-блоке пользователя с интерфейсом VCI.

При этом исключается необходимость в повторной интеграции пользовательского СФ-блока на платформу. Необходимые изменения в СФ-блоках в платформе могут осуществляться автоматически с использованием ревизионных управляющих инструментальных средств. Например, такие инструментальные средства, как широко доступные утилиты CVS, могут импортировать исходное описание RTL платформы по мере получения от поставщика в репозиторий.

Пользовательские СФ-блоки могут быть интегрированы на платформу и также переданы в репозиторий. Последовательно генерируемые конфигурации платформы могут быть затем импортированы в репозиторий с сохранением различий между импортируемыми версиями, автоматически сохраняя все конструктивные изменения, которые были сделаны в предыдущей конфигурации, и маркируя любые конфликты между специфическими изменениями в конструкции и конфигурации.

Разработка реконфигурируемых производных платформ может быть в дальнейшем ускорена с созданием инструментальных средств разработки в форме интерфейса GUI, который позволяет свести базовую платформу и ее способности изменения конфигурации в один инструмент.

После построения системы инструментальные средства могут обрабатывать межсоединения между ядрами и пристроить необходимый контроллер прерывания. Специализированные пользователем СФ-блоки могут быть введены в библиотеку СФ-блоков инструментальных средств вместе с двунаправленным каналом, если ядро еще не сконструировано до требования архитектуры. Эти инструментальные средства позволяют значительно уменьшить время, необходимое для разработки производных платформ. Даже допускается дистанционное выполнение таких разработок с использованием сред Internet и Intranet.

При необходимости ускорения поставки изделий на рынок в данном случае также стала развиваться практика совместной разработки аппаратных и программных средств. Для этого используются различные методы, начиная от простого управления координацией разработки аппаратных и программных средств, используя общий язык спецификаций как для аппаратных, так и программных средств системы. Примерами являются система конструирования N2C фирмы CoWare и другие, в которых используются аппаратные спецификации на языке C.

При создании реконфигурируемых платформ также целесообразно использовать совместное конструирование аппаратных и программных средств. Платформы могут быть поставлены с уже конфигурируемыми средами разработки, состоящими из сборочных файлов проекта, программ на макроязыке и, возможно, даже инструментальных средств разработки, таких как компиляторы и устройства отладки. Коды также могут быть обеспечены, начиная от простых процедурных интерфейсов до аппаратных средств, конфигурируемых программ верификации, полностью отработанной операционной системы реального времени. Это позволяет осуществить разработку структуры программных средств системы и тестирование до интеграции дополнительных СФ-блоков, предназначенных для намеченного рынка.

Использование платформ с центральным положением памяти обеспечивает раннюю разработку процедурных интерфейсов к дополнительным СФ-блокам,