

Предисловие

Для аппаратуры космического назначения при всей важности экономических показателей определяющими требованиями являются высокая надежность, долговечность, повышенная стойкость к внешним воздействующим факторам (ВВФ), низкое энергопотребление, высокая функциональность, оперативность разработки и возможность изготовления в заданные сроки, длительный период поддержания производства. Непрерывное обновление и расширение номенклатуры и ассортимента радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) требует разработки специализированных микросхем. При этом потребность в специализированных микросхемах конкретных типов может быть крайне низкой и составлять сотни и даже десятки микросхем. Кроме того, для подавляющего большинства аппаратуры космического назначения обязательным условием является применение отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ).

Специализированные микросхемы можно разделить на три группы: заказные микросхемы, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и полузаказные большие интегральные схемы (БИС) на основе базовых и базовых матричных кристаллов. Принято считать, что полностью заказные микросхемы обеспечивают максимальную функциональность, надежность и стойкость к ВВФ, минимальную стоимость при массовом производстве, но требуют максимальных затрат при разработке и освоении производства, поэтому для производства малых партий БИС экономически не эффективны. ПЛИС, обладая преимуществами при разработке микросхемы, в то же время за счет наличия дополнительных элементов для программирования их структуры, снижающих надежность микросхем, имеют более высокое энергопотребление и более высокую стоимость по сравнению с заказными БИС. Полузаказные большие интегральные схемы (БИС) занимают промежуточное положение между полностью заказными микросхемами и ПЛИС. По показателям надежности, энергопотребления и стойкости к ВВФ они сравнимы с заказными БИС, по длительности цикла «разработка – изготовление – поставка» сопоставимы с циклом «разработка – поставка – специализация» для ПЛИС. Это достигается благодаря применению методов прототипирования проекта полузаказной БИС средствами имитатора базового матричного кристалла (БМК) на ПЛИС. Производство полузаказных БИС наиболее эффективно при изготовлении малых и средних партий микросхем и может поддерживаться в течение длительного срока – более 15 лет.

Выбор способа реализации специализированных БИС определяется множеством критериев, но, как правило, именно полузаказные БИС обеспечивают наилучшее соотношение эксплуатационных показателей и затрат на разработку и освоение.

Базовый матричный кристалл (англ. Uncommitted Logic Array, ULA) – это универсальная заготовка в виде кремниевой пластины, на которой сформированы

кристаллы с матрицей транзисторных структур. Такие кристаллы называют базовыми, поскольку все фотошаблоны для их изготовления, за исключением слоев металлизации, являются постоянными и не зависят от реализуемой схемы. Простейшие элементы (КМОП транзисторы) располагаются на БМК в виде регулярной матрицы, поэтому его называют матричным.

В отличие от ПЛИС, логика работы которых задается посредством программно управляемых элементов, БМК специализируется технологически в процессе микроразноэлектронного производства путем формирования соединений транзисторов на поле БМК в одном или нескольких слоях металлизации. В сравнении с ПЛИС в структуре БМК отсутствуют избыточные элементы, что в несколько раз снижает общую сложность микросхемы, повышая ее надежность.

Кроме того, необходимо отметить следующие преимущества БМК:

- развитая библиотека функциональных ячеек и типовых схемотехнических решений значительно упрощает процесс разработки логического проекта, уменьшает время и повышает качество проектирования;
- в составе одного БМК могут быть реализованы как цифровые, так и цифроаналоговые узлы и блоки;
- БМК имеют фиксированную геометрическую структуру, что значительно упрощает автоматическое размещение ячеек и синтез топологии БИС;
- формирование БИС на БМК выполняется с помощью малого числа фотошаблонов, что значительно уменьшает сроки изготовления и затраты при производстве БИС;
- БИС, разработанные на основе БМК, не требуют проведения квалификационных испытаний, что существенно сокращает сроки и стоимость освоения их в производстве.

Таким образом, при выборе отечественной элементной базы для создания новой аппаратуры космического назначения необходимо учитывать, что универсальные БИС не обеспечат реализацию эффективных схемных решений, а разработка заказных микросхем и их освоение в производстве потребуют существенных финансовых и временных затрат. Применение же полузаказных микросхем на основе БМК обеспечит быструю реализацию необходимых микросхем требуемого уровня качества, при этом экономическая эффективность изготовления микросхем будет достигнута для партий размером от единиц до сотен тысяч штук. Благодаря указанным преимуществам для аппаратуры космического назначения на данный момент БИС на основе БМК не имеют альтернативы.

Серия практических пособий в 4 книгах под общим названием «Полузаказные БИС на БМК серий 5503 и 5507» позволяет изучить методологию проектирования микросхем на основе указанных серий БМК, освоенных в производстве и разрешенных к применению в аппаратуре космического назначения, содержит необходимые сведения для организации процесса разработки и позволяет получить практические навыки в разработке полузаказных БИС.

Книга 1 «Методология проектирования и освоение производства» посвящена теоретическим основам разработки полузаказных микросхем на основе БМК. В ней описаны конструкция и технология изготовления БМК серий 5503 и 5507, назначение и область применения полузаказных микросхем, приведены основные характеристики БМК. Отдельный раздел книги посвящен методологии разработки БИС, в том числе маршруту и методике проектирования микросхем, средствам

прототипирования полузаказных БИС. Рассмотрены нормативная техническая документация, виды и состав испытаний микросхем.

В качестве примера для получения практических навыков по методике проектирования детально описан процесс разработки средствами САПР «Ковчег 3.04» микросхемы управления бытовым двухкамерным холодильником и морозильником, от формирования технических требований к микросхеме до подготовки конструкторской документации для ее изготовления.

Книга 2 «Система автоматизированного проектирования «Ковчег 3.04» содержит описание САПР «Ковчег 3.04», предназначенной для разработки полузаказных КМОП БИС на основе БМК серий 5503 и 5507. В ней приведены типовые проектные процедуры, используемые при разработке специализированных КМОП микросхем на основе БМК, детально описаны меню, параметры и команды подсистем САПР, обеспечивающие разработку и подготовку БИС к производству: графический редактор схем, редактор описания схем в формате Verilog Netlist, подсистема функционально-логического моделирования, подсистема размещения ячеек на поле БМК, подсистемы синтеза и оптимизации топологии, специализированный топологический редактор, подсистемы верификации и расчета параметров топологии, подсистема анализа устойчивости проекта, средства обеспечения оперативного прототипирования БИС с помощью имитатора и др.

В книге 3 «Библиотека функциональных ячеек» приведено описание унифицированных библиотек функциональных ячеек 5503 и 5503+ для проектирования средствами САПР «Ковчег» различных интегральных микросхем на основе БМК серий 5503 и 5507. Рассмотрены особенности функциональных ячеек, представлена система буквенных обозначений, состав групп ячеек. В алфавитном порядке представлены описания функциональных ячеек, включающие имя ячейки, графический образ, описание функционирования, таблицу истинности, расчетные значения задержек распространения сигналов, рекомендуемые значения нагрузочной способности выходов, топологический размер ячейки и др. В отдельном разделе описаны аналоговые и цифроаналоговые ячейки, такие как компараторы, операционные усилители, и другие ячейки специального назначения.

Книга 4 «Библиотека ячеек для проектирования самосинхронных полузаказных микросхем» содержит описание унифицированной библиотеки функциональных ячеек 5503СС, предназначенной для проектирования средствами САПР «Ковчег» самосинхронных интегральных микросхем на основе БМК серий 5503 и 5507. В книге представлена система буквенных обозначений, состав групп ячеек, в алфавитном порядке представлены описания самосинхронных ячеек.

Самосинхронные схемы характеризуются рядом параметров, выгодно отличающих их от синхронных и асинхронных схем, в том числе устойчивостью функционирования к разбросу параметров технологии изготовления БИС, отклонениям параметров элементной базы из-за старения элементов, изменения температуры, напряжения источника питания и других внешних факторов.

Учитывая относительную новизну самосинхронных схем, в книге 4 подробно рассмотрены основные принципы и методы проектирования самосинхронных схем, приведены потенциальные преимущества самосинхронных схем и причины медленного развития самосинхронной схемотехники, на качественном уровне описываются различия синхронных, асинхронных и самосинхронных схем. Приведена классификация самосинхронных схем, изложены основные принципы

проектирования комбинационных и последовательностных схем, подробно рассмотрены вопросы конвейеризации самосинхронных схем, реализации отказоустойчивости самосинхронных схем и оптимизации их энергопотребления, а также ограничения при проектировании самосинхронных схем и организация интерфейса между синхронными и самосинхронными схемами, изложено руководство по квалификационному анализу разработанных схем на предмет их соответствия принципам самосинхронности.

Промышленная версия САПР «Ковчег 3.04» доступна для свободного копирования на нашем сайте (<http://www.asic.ru>). Приобретя книги серии, читатель сможет создать на своем компьютере полноценное рабочее место для разработки БИС на БМК серий 5503 и 5507, которые могут быть изготовлены на микроэлектронном производстве НПК «Технологический центр» (www.asic.ru).

Авторы надеются, что выпуск серии практических пособий «Полузаказные БИС на БМК серий 5503 и 5507» будет способствовать подготовке инженеров — специалистов в области разработки БИС и аппаратуры на их основе. Авторы будут признательны всем читателям, которые пришлют свои замечания и предложения по содержанию книг серии по адресу: kovcheg@asic.ru.

Введение

Предлагаемая вашему вниманию книга посвящена процессу создания полузаказных микросхем на основе БМК и содержит шесть разделов. Каждый раздел имеет самостоятельное оглавление и составную нумерацию страниц, включающую номер раздела и номер страницы в пределах раздела. Рисунки также имеют составные номера.

- ***Раздел 1. Базовые матричные кристаллы***

Раздел содержит общие сведения о базовых матричных кристаллах, информацию об отечественных БМК, выпускаемых в настоящее время. Также в разделе описаны конструкции БМК серий 5503 и 5507, технология их изготовления, приведены основные электрические параметры, описан маршрут проектирования БИС и аппаратуры с применением имитаторов БМК.

- ***Раздел 2. Нормативно-техническая документация на полузаказные микросхемы***

Раздел включает сведения о нормативно-технической документации, регламентирующей требования к микросхемам, составу и назначению конструкторской документации, необходимой при производстве полузаказных микросхем.

- ***Раздел 3. Группы и состав испытаний полузаказных микросхем***

Раздел посвящен группам и составу испытаний, гарантирующим качество микросхем в процессе их разработки и производства.

- ***Раздел 4. Порядок разработки и освоения производства полузаказной микросхемы***

В разделе рассмотрены порядок разработки полузаказной микросхемы, взаимодействие заказчика и исполнителя в процессе разработки и освоения серийного выпуска микросхем.

- ***Раздел 5. Рекомендации по разработке аппаратуры с применением БМК***

Раздел посвящен методологии разработки полузаказных микросхем, правилам проектирования и средствам прототипирования.

- ***Раздел 6. Пример проектирования полузаказной микросхемы средствами САПР «Ковчег 3.04»***

В разделе приведен пример разработки полузаказной микросхемы средствами САПР «Ковчег». Детально описан весь процесс разработки микросхемы управления бытовым двухкамерным холодильником и морозильником, от формирования технических требований к микросхеме до подготовки конструкторской документации для ее изготовления.

Базовые матричные кристаллы

1	Базовые матричные кристаллы	1
	Нормативно-техническая документация на полузаказные микросхемы.....	2
	Группы и состав испытаний полузаказных микросхем.....	3
	Порядок разработки и освоения производства полузаказной микросхемы	4
	Рекомендации по разработке аппаратуры с применением БМК	5
	Пример проектирования полузаказной микросхемы средствами САПР «Ковчег 3.04»	6

Раздел 1.

Базовые матричные кристаллы

Особенности полузаказных БИС на основе БМК.....	1-2
Отечественные БМК и ПЛИС: краткая историческая справка.....	1-4
Конструкции БМК.....	1-6
Порядок разработки БМК.....	1-7
Порядок разработки полузаказных БИС на основе БМК.....	1-8
Основные характеристики серий БМК 5503 и 5507	1-9
Основные характеристики	1-10
Электрические параметры.....	1-11
Предельные режимы эксплуатации	1-12
Технологический маршрут изготовления	1-13
Конструкция БМК серий 5503 и 5507	1-16
Базовая ячейка	1-19
Периферийная ячейка	1-22
Каналы трассировки.....	1-24
Корпусное исполнение	1-25
Стойкость к воздействию внешних факторов	1-26
Механические факторы.....	1-26
Климатические факторы	1-27
Факторы космического пространства	1-27
Библиотека функциональных ячеек	1-27
САПР «Ковчег 3.04»	1-28

Особенности полужаказных БИС на основе БМК

Микроэлектроника является одной из отраслей промышленности, определяющих научно-технический прогресс человеческого общества. Большинство процессов, связанных с развитием микроэлектроники, носит явно выраженный экспоненциальный характер, а темпы развития таковы, что подобных им еще не знало человечество. В отличие от обычных отраслей промышленности, где разработка более быстрого и лучшего устройства с удвоенными функциональными возможностями обычно удваивает стоимость разработки и производства изделия, в микроэлектронике справедливо обратное: переход на новые (меньшие) технологические нормы приводит к удешевлению с одновременным увеличением функциональных возможностей интегральных микросхем.

В этих условиях актуальной становится задача ускорения темпов разработки ЭКБ для современной РЭА, особенно БИС, которые можно разделить на два основных класса: универсальные и специализированные микросхемы. К первому классу относятся микропроцессоры, микроконтроллеры, периферийные устройства, устройства памяти (ПЗУ, ОЗУ и т.д.), серии стандартных микросхем и др., т.е. микросхемы, объем производства которых составляет сотни тысяч и миллионы штук в год. Большие объемы выпуска универсальных микросхем минимизируют вклад в их стоимость относительно больших затрат на проектирование и освоение в производстве.

Микросхемы, принадлежащие ко второму классу, при объеме производства до нескольких десятков тысяч в год, выпускаются для удовлетворения нужд отдельных отраслей промышленности и конкретных типов РЭА. Значительная часть стоимости таких микросхем определяется затратами на их проектирование.

Особую группу среди специализированных микросхем занимают БИС, применяемые в аппаратуре космического назначения и эксплуатируемые в условиях действия жестких ВВФ. Как правило, номенклатура таких микросхем велика, сроки разработки аппаратуры ограничены, а серийность в силу специфики аппаратуры не превышает нескольких тысяч, а иногда сотен микросхем. Производство специализированных микросхем обычно имеет прерывистый характер, а основной вклад в их стоимость вносят затраты на освоение производства и проведение квалификационных и периодических испытаний для подтверждения уровня качества микросхем.

Вследствие этого возникла необходимость в разработке новых подходов к проектированию БИС, направленных на уменьшение сроков и снижение стоимости проектирования и производства. В результате появились так называемые полужаказные интегральные микросхемы, в основе которых лежит унифицированная конструкция кристалла-заготовки. Первые схемы, созданные по этому принципу, были разработаны в 1960-х гг. Они изготавливались на унифицированном кристалле с фиксированным расположением функциональных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.). При этом проектирование заключалось в создании схемы из имеющегося на кристалле и доступного к применению ограниченного состава функциональных элементов, задании соответствия элементов схемы их расположению на кристалле и проведении межсоединений между ними. Кристалл получил название «базовый», поскольку все фотошаблоны для его изготовления, кроме слоев коммутации, являлись постоянными и не зависели от реализуемой схемы.

Этот подход, однако, не получил широкого распространения из-за неэффективного использования площади кристалла, вызванного фиксированным расположением функциональных элементов и длинными связями коммутации.

Другой подход, основанный на частичной унификации топологии интегральных микросхем, состоял в проектировании схем на основе набора типовых ячеек. В данном случае унификация состояла в разработке библиотеки функциональных элементов в виде топологии типовых ячеек, имеющих стандартизованные ограничения на размеры, например фиксированную ширину ячеек. Благодаря этому процесс проектирования сводился к размещению в виде линеек типовых ячеек, соответствующих функциональным элементам схемы, к размещению этих линеек на кристалле и к соединению элементов в промежутках между линейками. Ширина таких промежутков, называемых каналами, определялась в процессе трассировки. Хотя при данном подходе за счет унификации топологии ячеек упростился процесс проектирования, кристалл уже не являлся базовым, поскольку комплект фотошаблонов для каждой микросхемы был уникальным.

Современные полузаказные схемы обычно реализуются на БМК. Базовый матричный кристалл представляет собой регулярное поле не соединенных между собой простейших базовых элементов (отдельных транзисторов или групп транзисторов), окруженное областью периферийных контактов. Указанные простейшие элементы расположены на кристалле матричным способом, т.е. в узлах регулярной прямоугольной сетки. Как и в схемах на типовых ячейках, имеется библиотека функциональных ячеек, топологии которых фиксированы и реализуют достаточный для построения схем набор логических функций. Однако в данном случае любая ячейка за счет регулярного расположения простейших элементов может быть размещена в любом месте поля БМК, а для освоения конкретной БИС в производстве требуется спроектировать и изготовить фотошаблоны слоев коммутации и отладить программы контроля на контрольно-измерительном оборудовании.

Таким образом, БМК пришли на смену микросхемам малой и средней степени интеграции и имеют в сравнении с ними неоспоримые преимущества:

- уменьшение габаритов аппаратуры за счет снижения количества используемых микросхем и уменьшения размеров печатных плат;
- повышение технических характеристик за счет увеличения системного быстродействия и сокращения потребляемой мощности;
- повышение надежности изделия за счет более высокой надежности БИС;
- возможность объединения в полузаказной микросхеме на основе БМК цифровой и аналоговой обработки информации;
- обеспечение защиты разработки за счет применения полузаказных микросхем, электрическую схему которых сложно повторить;
- возможность мелкосерийного выпуска БИС и др.

Область применения конкретного БМК определяется многими факторами — размером поля БМК, количеством внешних выводов, параметрами надежности и устойчивостью к ВВФ, параметрами технологии и технологическими нормами, конструкцией ячеек поля БМК и периферийных ячеек, составом библиотеки функциональных ячеек, эффективностью и доступностью средств проектирования, сроками и стоимостью разработки, изготовления и поставки микросхем и др.

Основные достоинства БМК заключаются в снижении стоимости и сроков проектирования в сочетании с высокими эксплуатационными параметрами. Появление на рынке ПЛИС значительно расширило возможности разработчиков аппаратуры и составило конкуренцию БМК при создании изделий, на которые не распространяются ограничения по применению импортной элементной базы. Однако для аппаратуры космического назначения полузаказные микросхемы на основе БМК на данный момент не имеют альтернативы. При этом следует иметь в виду, что эксплуатационные параметры БМК значительно превосходят аналогичные параметры ПЛИС индустриального исполнения, импортные ПЛИС военного и космического исполнения в нашу страну не поставляются, а номенклатура отечественных ПЛИС весьма ограничена (краткая характеристика отечественных ПЛИС приведена ниже).

Отечественные БМК и ПЛИС: краткая историческая справка

Наиболее активное развитие в нашей стране БМК получили в 1980-е гг. Практически на всех предприятиях, производящих микросхемы, были разработаны свои БМК, однако многие из них по разным причинам так и не были освоены в производстве.

Кризис 1990-х гг. привел к снижению номенклатуры выпускаемой элементной базы, в том числе БМК. Тем не менее направление БМК сохранилось и продолжало развиваться. Отечественные БМК, разработанные до 2000 г., вошедшие в МОП 44 001.02 Перечень изделий, разрешенных к применению в аппаратуре космического назначения, и выпускаемые до настоящего времени, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. БМК, разработанные до 2000 г.

Тип БМК	Размер поля, ячеек	Рабочая частота, МГц	Предприятие-изготовитель
1806ВП1, 1806ХМ1	1500	6	АО «Ангстрем»
1515ХМ1	3200	8	
1537ХМ1	3200	до 40	
1537ХМ2	17 800		
1592ХМ1	105 772	50	
1592ХМ2	63 468		
1592ХМ3	34390		
1592ХМ4	11275		
1593ХМ1	3364	40	
1593ХМ2	6400		
1582ВЖ2	1700	20	НПО «Физика»
1582ВЖ3	3213		
1582БЦ1Т	5084		

Новый век принес новые возможности. В настоящее время на отечественном рынке существует высокая потребность в полузаказных микросхемах нового поколения для различной аппаратуры аэрокосмического, научного, военного назна-

чения, систем связи и промышленной автоматики. Учитывая высокую сложность данной аппаратуры, для реализации современных специализированных микросхем необходимы БМК с объемом более 1 000 000 эквивалентных вентиляей.

За последние годы было разработано большое количество новых, современных БМК (табл. 1.2), созданы новые производства, расширена номенклатура применяемых типов корпусов, созданы эффективные средства проектирования. В таблице серым цветом обозначены серии БМК, выпускаемые нашим предприятием НПК «Технологический центр». Более подробную информацию по ним можно найти на сайте www.asic.ru.

Таблица 1.2. БМК, разработанные в период 2000–2017 гг.

Серия БМК	Количество типов кристаллов в серии	Размер поля, ячеек	Предприятие-изготовитель
5503	4	576–5478	НПК «Технологический центр»
5507	4	576–5478	
5510БЦ	2	500 000, 1 000 000	ПАО «Микрон»
5511	3	3072, 400 000, 1 000 000	ФНПЦ НИИС
5514	2	224	АО «Ангстрем»
5515	1	230	
5516	2	60 000, 100 000	
5517	1	6000	
5522	2	23 004, 123 000	
5524	1	150 000	
5529	5	100 000–2 270 000	
5554	1	511	АО «Ангстрем»
5585	1	500	ОАО «Интеграл»

В настоящее время рядом ведущих отечественных предприятий (АО «КТЦ «Электроника», ПАО «Микрон», АО «Ангстрем», АО «ПКК «Миландр») активно развивается разработка отечественных ПЛИС. По состоянию на 2017 г. были освоены в производстве 11 типов ПЛИС, основные характеристики которых приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Основные характеристики отечественных ПЛИС

Тип	Количество системных вентиляей	Напряжение питания / ток потребления	Предприятие-изготовитель
5576XC1	50 000	3,3 В / 15 мА	АО «ВЗПП-С»
5576XC4	200 000	1,8 В, 3,3 В / 20 мА	
5576XC6	50 000	1,8 В, 3,3 В / 15 мА	
5576XC7	30 000	1,8 В, 3,3 В / 10 мА	
5576XC2	2500	3,3 В / 15 мА	АО «КТЦ «Электроника»
5576XC3	100 000	1,8 В, 3,3 В / 20 мА	
5576XC8	50 000	1,8 В, 3,3 В / 20 мА	
5577XC1	1200	5,0 В / 20 мА	ОАО «Интеграл»
5578TC01	300 000	1,8 В, 3,3 В / 100 мА	АО «ВЗПП-С»
5578TC02	500 000	1,8 В, 3,3 В / 100 мА	
5578TC03	100 000	1,8 В, 3,3 В / 100 мА	

Конструкции БМК

Наибольшее распространение в настоящее время имеют БМК на КМОП структурах, реализованные либо на объемном кремнии, либо на структурах «кремний на изоляторе» (КНИ).

В конструкции БМК можно выделить регулярное поле, окруженное областью периферийных контактов. Для определения размера поля БМК используется понятие «эквивалентный вентиль». Один эквивалентный вентиль соответствует четырем КМОП транзисторам, на которых можно реализовать логическую функцию 2И-НЕ или 2ИЛИ-НЕ. При этом необходимо различать фактический размер поля и количество эквивалентных вентилях, которые могут быть использованы при реализации конкретной микросхемы. Отношение использованных эквивалентных вентилях к размеру поля БМК называется коэффициентом заполнения.

Сложность реализуемых на БМК микросхем определяется различными факторами: наличием многовыводных корпусов, возможностями охлаждения микросхем в аппаратуре, эффективностью средств проектирования и т.д. Реально не удастся использовать все 100% поля БМК. При заполнении БМК не более чем на 70%, как правило, удается спроектировать топологию автоматически средствами САПР без вмешательства разработчика. При большем заполнении топология разрабатывается в интерактивном режиме с участием разработчика. Увеличение плотности заполнения усложняет процесс проектирования, но в результате может быть использован меньший кристалл, производство которого будет дешевле. Поэтому обычно БМК разрабатывают сериями. Серию составляют несколько конструктивно подобных кристаллов с различным размером поля БМК, количеством внешних выводов и имеющих общую библиотеку функциональных ячеек. Размер поля БМК увеличивается примерно вдвое для каждого большего по размеру типа БМК в серии. Серии БМК также могут состоять из нескольких конструктивных исполнений одного типоразмера кристалла, изготовленных в различных типах корпусов.

Конструкция БМК, как правило, строится на топологических ячейках, включающих четыре КМОП транзистора – две комплементарные пары (два транзистора n-типа и два транзистора p-типа). Подобные ячейки позволяют эффективно использовать ресурсы БМК и реализовывать любые схемотехнические решения. Однако встречаются БМК с разногабаритными ячейками или с регулярно повторяющимися транзисторными структурами.

По конструкции поля наибольшее распространение получили БМК, имеющие канальную организацию, и БМК типа «море вентилях». При канальной организации поле БМК представляет собой последовательность столбцов или строк ячеек и каналов для трассировки (рис. 1.1а). При организации по типу «море вентилях» поле БМК представляет собой сплошную регулярную структуру однотипных ячеек (рис. 1.1б). Иногда в БМК используют в качестве дополнительного слоя коммутации отрезки поликремния, которые располагают в промежутках между ячейками. Подобное использование поликремния улучшает разводимость БМК, увеличивает максимальный коэффициент заполнения, но усложняет проектирование, так как использование поликремния может существенно увеличить задержки распространения сигналов в топологии.

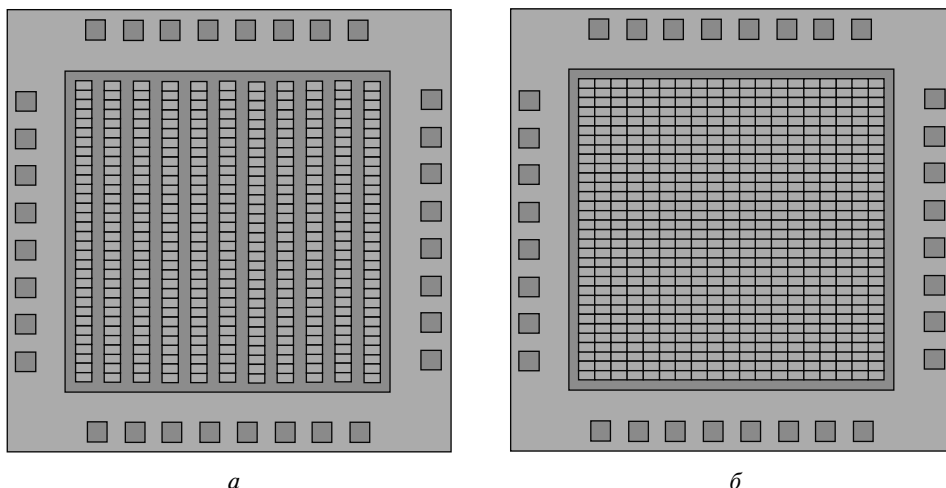


Рис. 1.1. Варианты конструкций БМК:
а – канальная; *б* – «море вентиляей»

Порядок разработки БМК

Разработке полужаказных микросхем предшествует этап разработки и освоения в производстве БМК, который выполняется в форме опытно-конструкторской работы (ОКР) в соответствии с ГОСТ РВ 15.215. При этом решается целый комплекс проектных, технологических, технических и производственных задач, выпускается комплект конструкторской и технологической документации, а результаты разработки подтверждаются квалификационными испытаниями.

При разработке БМК можно выделить следующие основные виды работ:

- определение области применения (народно-хозяйственное или специальное назначение) и основных технических требований на БМК (напряжение питания, требования по устойчивости к статическому электричеству, климатическим, механическим, космическим факторам, надежности и др.);
- разработка технического задания (ТЗ) на ОКР либо в соответствии с требованиями ГОСТ 18725 для микросхем народно-хозяйственного назначения, либо в соответствии с требованиями ОСТ В 11 0998 и ГОСТ РВ 15.201 для микросхем космического применения;
- выбор или разработка технологии изготовления БИС на основе БМК, обеспечивающей выполнение требований ТЗ на БМК;
- разработка конструкции и топологии БМК, включая разработку топологии ячейки поля БМК и периферийной ячейки «ввода/вывода», контактов «ЗЕМЛЯ», «ПИТАНИЕ»;
- выбор или разработка корпуса, в котором будет выполняться поставка микросхем;
- разработка библиотеки функциональных ячеек, которая включает базовые функциональные ячейки и составные ячейки, реализованные на основе базовых;
- разработка и настройка на конструкцию и библиотеку БМК средств проектирования БИС;

- разработка рабочей конструкторской и технологической документации, необходимой и достаточной для изготовления опытной партии микросхем;
- разработка аттестационной БИС, которая должна включать все базовые функциональные ячейки и иметь максимально достижимый коэффициент заполнения поля БМК;
- подготовка производства БИС, включая разработку необходимой технологической оснастки для изготовления и проведения испытаний микросхем;
- изготовление опытной партии аттестационной БИС;
- проведение квалификационных испытаний опытной партии аттестационной БИС с целью подтверждения параметров, указанных в технической документации на БМК;
- утверждение после коррекции по результатам проведения квалификационных испытаний комплектов конструкторской и технологической документации;
- включение БМК в перечень изделий, разрешенных к применению в аппаратуре космического назначения.

ОКР по разработке БМК по срокам и стоимости сопоставима с ОКР на разработку заказной БИС. Однако указанные в технических условиях на БМК параметры, подтвержденные при проведении квалификационных испытаний, распространяются без проведения дополнительных испытаний на все БИС, в последующем разработанные на основе данного БМК. Именно за счет этого удешевляется и ускоряется процесс проектирования и освоения БИС в производстве, так как все наиболее дорогостоящие и длительные процедуры проектирования, подготовки производства и испытаний уже выполнены при проведении ОКР по разработке БМК.

Как правило, в рамках ОКР разрабатывается не один, а несколько типов БМК, различающихся размером поля, количеством внешних выводов и типом корпуса. БМК, составляющие одну серию, являются конструктивно-подобными изделиями, что позволяет распространять многие результаты квалификационных и периодических испытаний старших типов БМК на всю серию.

Порядок разработки полузаказных БИС на основе БМК

Порядок разработки полузаказных микросхем регламентируется ГОСТ 27394 «Микросхемы интегральные полузаказные и заказные. Порядок разработки и деления работ между Исполнителем и Заказчиком».

Для проектирования полузаказной БИС выбирается тип БМК, имеющий достаточный для реализации схемы размер поля и количество внешних выводов, а также тип корпуса и параметры устойчивости к внешним воздействующим факторам, соответствующие области применения БИС.

Процесс проектирования микросхемы включает следующие этапы:

- разработка ТЗ на полузаказную БИС;
- разработка логической схемы БИС в базе библиотеки функциональных ячеек выбранной серии БМК;
- разработка функциональных тестов для проверки логической схемы БИС на соответствие требованиям ТЗ;

- разработка контрольно-диагностических тестов для разбраковки БИС в процессе производства;
- размещение ячеек «ввода-вывода» и ячеек логической схемы БИС на поле БМК;
- синтез топологии БИС;
- аттестация проекта БИС на устойчивость к разбросу параметров технологии изготовления БИС и влиянию ВВФ;
- прототипирование проекта микросхемы средствами имитатора, исследование функционирования имитатора БИС в аппаратуре заказчика;
- коррекция проекта микросхемы и изготовление макетных образцов БИС;
- исследование функционирования макетных образцов БИС в аппаратуре заказчика, коррекция по результатам исследования проекта микросхемы;
- разработка карты заказа и программы контроля для организации измерений БИС в процессе производства;
- изготовление опытной партии БИС;
- испытание микросхем опытной партии БИС в аппаратуре заказчика, оформление заключения о возможности применения полузаказной микросхемы в аппаратуре и готовности БИС к серийной поставке;
- утверждение карты заказа на полузаказную БИС и внесение обозначения микросхемы в таблицу серийно поставляемых микросхем в технические условия (ТУ) на БМК.

Из представленного выше перечня работ видно, что процесс проектирования БИС нацелен на оперативное решение задач по разработке конкретной аппаратуры и минимизации рисков заказчика.

Основные характеристики серий БМК 5503 и 5507

Серии БМК 5503 и 5507 нашли наибольшее распространение в аппаратуре космического назначения. На БМК этих серий разработано более 600 типов БИС, в том числе для космических аппаратов и кораблей: «Прогресс-М», «Союз-ТМА», «Меридиан», «Лабиринт», «Пион», «Аркон-2», «Электра», «Луч», «ГЛОНАСС-М», «ГЛОНАСС-К», «Кондор», «Экспресс», «Электро-Л», «Спектр-Р», «КазСат-2», системы управления разгонным блоком «Бриз-М» и др. (рис. 1.2).

Серии БМК 5503 и 5507 являются полными конструктивными и функциональными аналогами, изготавливаются по КМОП технологии, состоят из девяти типов БМК каждая и отличаются только напряжением питания. Серия БМК 5503 имеет напряжение питания $5 \text{ В} \pm 10\%$, среднее время задержки на вентиль не более 2,0 нс. Напряжение питания микросхем серии 5507 составляет $3 \text{ В} \pm 10\%$, среднее время задержки на вентиль не более 3,5 нс. Обе серии БМК введены в МОП 44 001.02 Перечень изделий, разрешенных к применению в аппаратуре космического назначения.

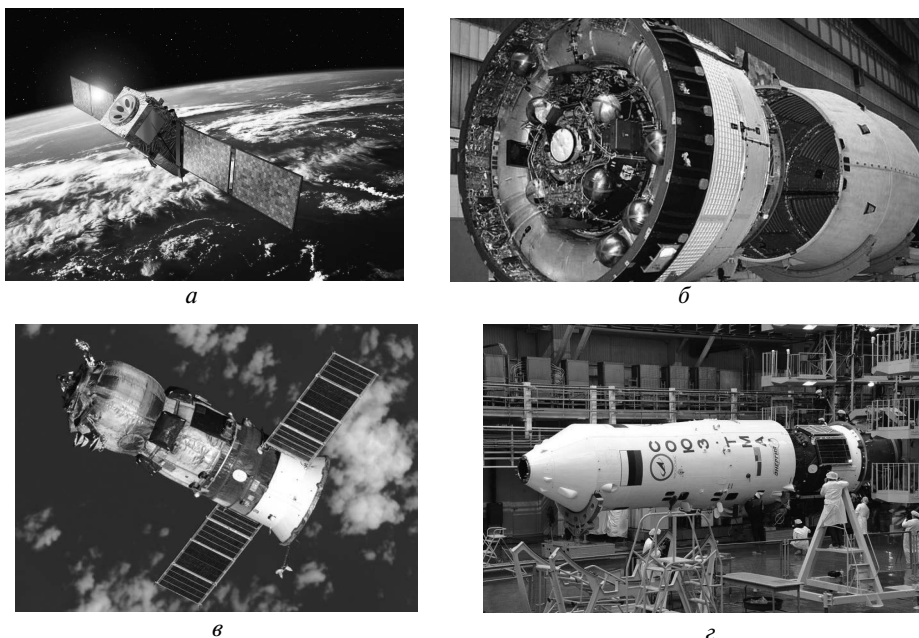


Рис. 1.2.

a – Серии космических аппаратов «Экспресс», «Глонасс», «Электро-Л», «Спектр-Р» и др.;
б – разгонный блок «Бриз-М» (более 100 пусков); *в* – космический корабль «Прогресс-М»
 (более 40 пусков); *г* – космический корабль «Союз-ТМА» (более 30 пусков)

Основные характеристики

Состав серий БМК 5503 и 5507 приведен в табл. 1.4.

Различают номинальные значения электрических параметров микросхем, предельно допустимые и предельные режимы эксплуатации микросхем. Номинальные значения электрических параметров контролируются при изготовлении и поставке микросхем, гарантируются в процессе их эксплуатации в режимах и условиях, допускаемых ТУ.

Таблица 1.4. Состав серий БМК 5503 и 5507

Тип БМК	Размер поля БМК, эквивалентных вентиляей	Количество информационных контактов	Рабочая частота, не более, МГц	Обозначение технических условий
H5503XM1	576	26	30	АЕЯР.431260.159 ТУ
5503XM1У				
H5503XM2	1296	40	30	АЕЯР.431260.165 ТУ
5503XM2Г				
H5503XM5	3072	62	30	АЕЯР.431260.146 ТУ
5503XM5Г				
5503БЦ7У	5478	60	25	АЕЯР.431260.272 ТУ
5503БЦ7Т		64		
5503БЦ7Т1		80		

Тип БМК	Размер поля БМК, эквивалентных вентилей	Количество информационных контактов	Рабочая частота, не более, МГц	Обозначение технических условий
5507БЦ1У	576	26	25	АЕЯР.431260.227 ТУ
5507БЦ1У1				
5507БЦ2У	1296	40	25	АЕЯР.431260.228 ТУ
5507БЦ2Т				
5507БЦ5У	3072	62	25	АЕЯР.431260.230 ТУ
5507БЦ5Т				
5507БЦ7У	5478	60	25	АЕЯР.431260.231 ТУ
5507БЦ7Т		64		
5507БЦ7Т1		80		

Электрические параметры

Номинальные значения электрических параметров микросхем, изготовленных на основе БМК серии 5503, представлены в табл. 1.5. Номинальное значение напряжения питания $U_{CC} = \pm 5$ В.

Таблица 1.5. Номинальные значения электрических параметров серии 5503

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма		Температура, °С
		не менее	не более	
Выходное напряжение низкого уровня, В, при $I_{OL} = 4,0$ мА	U_{OL}		0,4	-60 +85
Выходное напряжение высокого уровня, В, при $I_{OH} = 2,0$ мА	U_{OH}	4,0		-60 +85
Ток потребления, мА	I_{CC}		0,15	+25
			0,4	-60 +85
Токи утечки низкого и высокого уровней на входе, мкА	I_{LIL} , I_{LIH}		0,3	+25
			3,0	-60 +85
Выходной ток низкого и высокого уровней в состоянии «Выключено», мкА	I_{OZL} , I_{OZH}		0,3	+25
			3,0	-60 +85
Ток доопределения внешнего вывода до высокого уровня, мА	I_{HIR}	0,03	1	-60 +85
Ток доопределения внешнего вывода до низкого уровня, мА	I_{LIR}	0,07	2	-60 +85
Время задержки на вентиль, нс	t_D		2,0	+25
			3,0	-60 +85
Входная емкость, пФ	C_I		7	+25
Емкость входа/выхода, пФ	$C_{I/O}$		7	+25

Номинальные значения электрических параметров микросхем, изготовленных на основе БМК серии 5507, представлены в табл. 1.6. Номинальное значение напряжения питания $U_{CC} = \pm 3$ В.

Таблица 1.6. Номинальные значения электрических параметров серии 5507

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма		Темпера- тура, °
		не менее	не более	
Выходное напряжение низкого уровня, В, при $I_{OL} = 3,0$ мА	U_{OL}		0,3	-60 +85
Выходное напряжение высокого уровня, В, при $I_{OH} = 1,5$ мА	U_{OH}	2,4		-60 +85
Ток потребления, мА	I_{CC}		0,15	+25
			0,4	-60 +85
			3,0	-60 +85
Токи утечки низкого и высокого уровней на входе, мкА	$I_{LIL},$ I_{LIH}		0,3	+25
			3,0	-60 +85
Выходной ток низкого и высокого уровней в состоянии «Выключено», мкА	$I_{OZL},$ I_{Ozh}		0,3	+25
Ток доопределения внешнего вывода до вы- сокого уровня, мА	I_{HIR}	0,03	1	-60 +85
Ток доопределения внешнего вывода до низ- кого уровня, мА	I_{LIR}	0,07	2	-60 +85
Время задержки на клапан, нс	t_D		3,0	+25
			5,0	-60 +85
Входная емкость, пФ	C_I		7	+25
Емкость входа/выхода, пФ	$C_{I/O}$		7	+25

Устойчивость микросхем серий 5503 и 5507 к воздействию электростатического потенциала составляет не менее 1000 В.

Предельные режимы эксплуатации

Предельно допустимые режимы эксплуатации – это внешние по отношению к микросхеме электрические параметры, в пределах значений которых допускается эксплуатация микросхемы. Превышение предельных режимов может привести к отказу микросхемы (табл. 1.7 и 1.8).

Таблица 1.7. Предельно допустимые и предельные режимы эксплуатации микросхем серии 5503

Наименование параметра, обозначение параметра, единица измерения	Норма			
	предельно допустимый режим		предельный режим	
	не менее	не более	не менее	не более
Напряжение питания, U_{CC} , В	4,5	5,5	-0,2	7,0
Напряжение, прикладываемое к выходу за- крытой микросхемы, В	0	U_{CC}	-0,4	$U_{CC} + 0,4$
Входное напряжение низкого уровня, U_{IL} , В		0,8	-0,4	