

ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-TELECOMMUNICATION SYSTEMS

УДК 621.3.038

Семейство серий базовых матричных кристаллов

С.В. Гаврилов¹, А.Н. Денисов^{1,2}, В.В. Коняхин^{1,2}, Н.И. Малашевич¹, Р.А. Фёдоров^{1,2}

¹НПК «Технологический центр» (г. Москва)

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Family of Gate Array Crystals Series

S.V. Gavrilov¹, A.N. Denisov^{1,2}, V.V. Koniachin^{1,2}, N.I. Malashevich¹, R.A. Fedorov^{1,2}

¹SMC «Technological Centre», Moscow

²National Research University of Electronic Technology, Moscow

Представлены результаты работ по созданию семейства базовых матричных кристаллов от серии 5503 объемом 5500 вентилей до серии 5529 объемом 2200000 вентилей со встроенными блоками ОЗУ. Описаны средства их проектирования и прототипирования.

Ключевые слова: базовый матричный кристалл; конструктивно-технологический базис; средства проектирования.

The results of work on development of a gate array family, which covers the range from 5503 series with the volume of 5500 gates to 5529 series with the volume of 2200000 gates with embedded RAM units, have been presented, and their design and prototyping tools have been described.

Keywords: gate array; constructive-technological basis; design tools.

Введение. Современная радиоэлектронная аппаратура специального назначения [1], особенно для аэрокосмического, научного, военного назначения, систем связи и промышленной автоматики, может быть создана только с использованием специализированных микросхем, реализованных как заказные, полузаказные на основе базового матричного кристалла (БМК) или программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Оптимальный выбор элементной базы для реализации аппаратуры зависит от множества факторов. Для аппаратуры специального назначения при всей важности экономических показателей определяющими факторами являются повышенная стойкость к внешним воздействиям, высокая надежность и долговечность, низкое энергопотребление, высокая функциональность, обеспечение разработки и поставки ИС в установленные сроки, длительный период поддержания производства данного типа ИС. При этом серийность специализированных микросхем крайне низка и может составлять сотни и даже десятки микросхем.

Принято считать, что полностью заказные микросхемы обеспечивают максимальную функциональность, надежность и стойкость, минимальную стоимость при массовом производстве, но требуют максимальных затрат на этапе разработки и освоения производства и для производства малых партий не применимы. ПЛИС имеют более высокое энергопотребление, дополнительные элементы для специализации, что снижает надежность микросхем и определяет их более высокую стоимость по сравнению с другими группами специализированных ИС. Полузаказные ИС занимают промежуточное положение между полностью заказными ИС и ПЛИС. По показателям надежности, энергопотребления и стойкости к внешним воздействующим факторам они сравнимы с заказными ИС, в то же время по длительности цикла разработка – изготовление – испытания сопоставимы с ПЛИС. Выбор способа реализации специализированных ИС для специальной аппаратуры определяется множеством факторов, но во многих случаях именно полузаказные ИС обеспечивают наилучшие показатели, тем более, что производство БМК, как правило, поддерживается в течение длительного времени (более 15 лет) [2].

Специальные конструктивно-технологические базисы. Для обеспечения требуемых технических параметров и эксплуатационных характеристик микросхем создаются специальные конструктивно-технологические базисы (КТБ). Средствами технологического моделирования выполняется разработка конструкции транзисторных структур и технологического маршрута их изготовления. В процессе моделирования определяются не только электрические параметры будущего прибора, но и влияние внешних воздействий на свойства прибора. На рис.1 приведена трехмерная модель прибора с распределением токов утечки после радиационного воздействия.

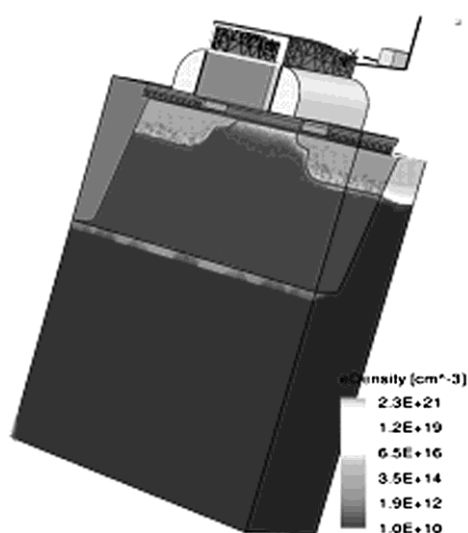


Рис.1. Трехмерная модель прибора с распределением токов утечки после радиационного воздействия

Разработка КТБ выполняется с учетом конкретного технологического оборудования, благодаря чему достигается повышенная стойкость микросхем к воздействию специальных факторов, в том числе космического пространства. На данный момент при изготовлении БМК используются три КТБ с применением КМОП-технологий на объемном кремнии и на структурах кремний на изоляторе, на которых реализованы пять серий БМК. Основные характеристики КТБ приведены в табл.1.

Разработка КТБ выполняется с учетом конкретного технологического оборудования, благодаря чему достигается повышенная стойкость микросхем к воздействию специальных факторов, в том числе космического пространства. На данный момент при изготовлении БМК используются три КТБ с применением КМОП-технологий на объемном кремнии и на структурах кремний на изоляторе, на которых реализованы пять серий БМК. Основные характеристики КТБ приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики КТБ для изготовления серий БМК

Серия БМК	Технология	Технологические нормы, мкм	Напряжение питания, В	Количество слоев коммутации
5503	КМОП	1,5	4,5–5,5	Один слой металла и один поликремний
5507	КМОП	1,5	2,7–3,3	
5521	КМОП	0,18	2,7–3,6	Шесть слоев металла
5528	КМОП	0,18	2,7–3,6 1,62–1,92	Шесть слоев металла
5529	КМОП КНИ	0,25	2,7–3,6	Шесть слоев металла

Особенности базового матричного кристалла. БМК – это универсальная заготовка для полужаказных ИС. В отличие от ПЛИС БМК специализируется технологически путем формирования слоев металлизации. В структуре БМК отсутствуют избыточные элементы программирования электрической схемы, что значительно снижает общую сложность микросхемы и повышает ее надежность. Использование полужаказных микросхем имеет ряд преимуществ:

- уменьшаются габариты аппаратуры за счет снижения количества используемых микросхем и уменьшения размеров печатных плат;
- улучшаются технические характеристики за счет увеличения системного быстродействия и сокращения потребляемой мощности;
- повышается надежность изделия за счет более высокой надежности БИС по сравнению с дискретными элементами;
- имеется возможность объединения в полужаказной микросхеме цифровой и аналоговой обработки информации;
- обеспечивается защита разработки от возможного несанкционированного воспроизводства.

Все наиболее дорогостоящие и длительные процедуры проектирования, производства и аттестации полужаказных ИС выполняются на этапе освоения БМК, разработка которого осуществляется с учетом жестких условий эксплуатации. Микросхемы изготавливаются по стандартной технологии массового производства. Эксплуатационные параметры ИС определяются параметрами БМК и подтверждаются квалификационными испытаниями. Для этого проводятся испытания тестовых микросхем, выпускаются групповые технические условия. В качестве документации на полужаказную ИС формируется карта заказа, которая является приложением к групповым техническим условиям, поэтому квалификационные испытания новой микросхемы не проводятся.

Для создания полужаказной ИС выбирается необходимый по объему и параметрам БМК. Проектирование микросхемы заключается в разработке электрической схемы и соответствующей топологии слоев металлизации, а производство кристаллов – в формировании этих слоев на ранее изготовленных и аттестованных пластинах – полуфабрикатах с уже сформированными транзисторными структурами.

Семейство серий базовых матричных кристаллов. НПК «Технологический центр» специализируется в области разработки БМК, а также изготовления средств проектирования и прототипирования микросхем на их основе. На сегодняшний день разработано семейство серий БМК, имеющих унифицированную библиотеку базовых и типовых функциональных ячеек, единые средства проектирования на базе САПР «Ковчег» и средства прототипирования микросхем. Младшими сериями семейства БМК являются серии 5503 и 5507.

Серии БМК 5503 и 5507 (табл.2) унифицированы по составу и изготавливаются по радиационно стойкой КМОП-технологии с нормами 1,5 мкм на объемном кремнии. Разводка осуществляется в первом слое металла и слое поликремния. БМК этих серий имеют категорию качества «ВП» и разрешены к применению в аппаратуре специального назначения.

На базе БМК серий 5503 и 5507 разработано и выпускается более 600 полужаказных микросхем различного назначения, в том числе для космической аппаратуры, например для космических кораблей «Прогресс-М», «Союз-ТМА», разгонного блока «Бриз-М» и других аппаратов. Среди них можно выделить различные контроллеры, интерфейсные ИС, приемопередатчики, ИС трансформаторной развязки.

Таблица 2

Основные характеристики БМК серий 5503 и 5507

Тип БМК	Количество условных вентилях в поле БМК	Количество внешних контактов	Напряжение питания, В	Рабочая частота, МГц	Тип корпуса
H5503XM1	576	28	5	30	H09.28-1B
H5503XM2	1296	42	5	30	H14.42-1B
H5503XM5	3072	64	5	30	H18.64-1B
5503БЦ7У	5478	64	5	25	H18.64-1B
5507БЦ1У	576	28	3	25	H09.28-1B
5507БЦ2У	1296	42	3	25	H14.42-1B
5507БЦ5У	3072	64	3	25	H18.64-1B
5507БЦ7У	5478	64	3	25	H18.64-1B

Несмотря на длительный срок эксплуатации (более 15 лет), серии 5503 и 5507 остаются востребованными. С целью повышения эксплуатационных характеристик микросхем осваиваются в производстве новые корпусные исполнения в планарных металлокерамических корпусах с шагом выводов 0,5 мм (табл.3).

Таблица 3

Состав осваиваемых в производстве типов БМК серий 5503 и 5507

Тип БМК	Количество условных вентилях	Количество внешних выводов	Тип корпуса
5503XM1У (5507БЦ1Т)	680	28	5123.28-1
5503XM2У (5507БЦ2Т)	1296	42	4217.44-1
5503XM5Т (5507БЦ5Т)	3072	64	4239.68-1
5503БЦ7Т (5507БЦ7Т)	5478	68	4239.68-1
5503БЦ7Т1 (5507БЦ7Т1)	5478	84	4247.100-1

Серии БМК 5521 и 5529 также унифицированы по составу и состоят из девяти типов БМК объемом 39, 75, 180, 380, 800, 900, 1250, 1700 и 2200 тыс. вентилях в различных корпусных исполнениях (табл.4).

Приведем основные характеристики БМК серий 5521 и 5529:

- КМОП-технология изготовления:
 - для серии 5521 – базовая КМОП-технология 0,18 мкм на объемном кремнии,
 - для серии 5529 – базовая КМОП-технология 0,25 мкм на структурах кремний на изоляторе;
- напряжение питания микросхем в диапазоне 2,7–3,6 В;
- изготовитель кристаллов микросхем – ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Москва);
- разводка от 4 до 6 слоев металла;
- рабочая частота до 100 МГц;
- разработка БИС осуществляется с применением оригинальных средств топологического проектирования и методов прототипирования проекта микросхемы в аппаратуре заказчика.

Таблица 4

Основные характеристики БМК серии 5529

Условное обозначение микросхем	Тип корпуса	Количество внешних/информационных выводов	Размер поля БМК (условных вентиляей)	Габариты БМК, мм	Категория качества
5529ТН015	5123.28-1	28/26	35 168	2,59×2,59	ОТК
5529ТН025 5529ТН025А	4217.44-1 5123.28-1	44/40	75 912	3,22×3,22	ОТК ОТК
5529ТН034 5529ТН035 5529ТН035А	5134.64-6 4239.68-1 4217.44-1	68/64	183 624	4,33×4,33	ВП ВП ОТК
5529ТН044 5529ТН044А	4237.100-1 42.39.68-1	100/92	388 320	5,74×5,74	ОТК ОТК
5529ТН054 5529ТН054А 5529ТН054В	4229.132-3 4248.144-1 4247.100-1	144/128	813 000	7,77×7,77	ВП ВП ВП
5529ТН064 5529ТН064А	4245.240-6 4249.176-1	176/160	924 960	8,55×8,55	ВП ОТК
5529ТН074 5529ТН074А	4250.208-1 4249.176-1	208/184	1 260 872	9,93×9,93	ОТК ОТК
5529ТН084 5529ТН084А	4245.240-7 4250.208-1	240/208	1 792 256	11,3×11,3	ВП ОТК
Б5529ТН11Н4	Бескорпусный	604/572	2 272 992	14,53×12,24	ВП

Примечание: ОТК – отдел технического контроля; ВП – военная приемка.

Конструктивно поле БМК серий 5521 и 5529 состоит из четырех равных частей, каждая из которых может иметь независимое питание, что позволяет создавать на этих БМК отказо- и сбоеустойчивые троированные системы с «холодным» резервом для высоконадежной аппаратуры. Отличительной особенностью серий 5521 и 5529 является возможность реализации в них блоков оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), что позволяет существенно расширить область их применения, улучшить функциональные и эксплуатационные характеристики аппаратуры [3, 4]. В основе ячейки ОЗУ лежит триггер, построенный на двух инверторах со схемой регенерации записанных ранее данных. Такая структура ячейки памяти в отличие от шеститранзисторной ячейки имеет преимущества. В процессе записи информации в выбранной ячейке нет «борьбы» между новыми и старыми данными. Это объясняется тем, что вход и выход предлагаемой ячейки в режиме записи функционально между собой не связаны, поскольку разрывается схема подтверждения. При построении матрицы ОЗУ на основе полученной ячейки не требуется схема предзарядки шин данных, что способствует снижению тока потребления схемы. Испытания образцов микросхем серии 5529 подтвердили высокий уровень стойкости ячейки памяти к воздействию одиночных ядерных частиц, а

именно сбоев и отказов не обнаружено до уровня $64 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$, в совокупности с возможностью использования троированных триггеров могут быть реализованы сверхустойчивые к факторам космического пространства специализированные микросхемы.

Кроме того, сравнение с аналогами показало, что расчетное значение тока потребления ОЗУ на основе представленной ячейки меньше, чем у ОЗУ фирм Atmel и Honeywell. Электрическая схема ячейки ОЗУ защищена патентом [5].

Серия БМК 5528 создана для реализации низкопотребляющей аппаратуры и включает в свой состав один БМК объемом 1700 тыс. вентиляей, который поставляется в трех корпусных исполнениях.

Основные характеристики БМК серии 5528:

- КМОП-технология изготовления $0,18 \text{ мкм}$ с кольцевыми транзисторами на объемном кремнии;
- категория качества ОТК;
- напряжение питания:
 - периферийной области – $3,3 \text{ В} \pm 10\%$,
 - ядра БМК – $1,8 \text{ В} \pm 10\%$;
- изготовитель кристаллов микросхем – ОАО «НИИМЭ и Микрон»;
- разводка от 4 до 6 слоев металла;
- рабочая частота до 150 МГц ;
- разработка БИС осуществляется с применением оригинальных средств топологического проектирования и методов прототипирования проекта микросхемы в аппаратуре заказчика.

Средства проектирования. Все рассмотренные серии БМК имеют лицензионно-чистые средства проектирования (например, САПР «Ковчег»), которые промышленно эксплуатируются и совершенствуются более 30 лет. На сегодняшний день САПР «Ковчег» представляет собой интегрированную систему автоматизированного проектирования, позволяющую проводить все этапы проектирования полузаказной микросхемы, включая прототипирование [6] будущей микросхемы – от описания до ее производства. Схемотехнический графический редактор обеспечивает графический ввод электрических схем. Описание микросхемы может быть подготовлено и на языке высокого уровня Verilog и SystemVerilog. Подсистема функционально-логического моделирования позволяет получить временные диаграммы функционирования проекта БИС, оценить устойчивость проекта в зависимости от воздействия внешних факторов, провести анализ влияния топологических параметров на функционирование и устойчивость проекта. Совмещенная подсистема ручного и автоматического размещения ячеек на поле БМК позволяет повысить коэффициент заполнения поля до 80–90%. Синтез топологии выполняется с учетом списков цепей приоритетной разводки и скоростных цепей. Подсистема верификации проверяет выполнение требований стандарта кодирования топологии БИС и осуществляет проверку соответствия полученной топологии БИС ее логической схеме. Подсистема расчета топологии обеспечивает расчет задержек в топологических цепях с учетом возможного разброса топологических параметров. Подсистема аттестации проекта позволяет проверить поведение проекта микросхемы в зависимости от значений внешних воздействующих факторов и топологического разброса.

При разработке микросхем высокой сложности на БМК объемом более 100 тыс. вентиляей используются сторонние средства проектирования. Разработку логической модели микросхемы на уровне RTL-описания может выполнять заказчик, используя

при этом имеющиеся у него средства проектирования. Описание микросхемы должно быть подготовлено на языке высокого уровня Verilog или SystemVerilog. С целью определения объема проекта микросхемы для выбора типа БМК заказчик может выполнить синтез электрической схемы в базис БМК с последующим моделированием. Для этого применяется параметризованная унифицированная библиотека ячеек, которая предоставляется НПК «Технологический центр» после подписания соглашения о конфиденциальности. Взаимодействие средств проектирования при разработке специализированной БИС на основе БМК представлено на рис.2.

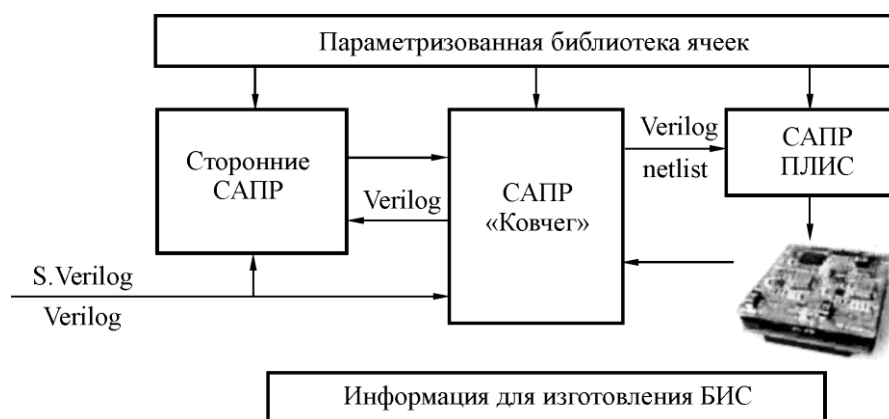


Рис.2. Взаимодействие средств проектирования при разработке специализированной БИС на основе БМК

Исходной информацией для разработки топологии средствами САПР «Ковчег» является описание логической модели и тестовых воздействий с выходными реакциями на языке Verilog или SystemVerilog. Средства топологического проектирования САПР «Ковчег» позволяют наиболее эффективно использовать конструктивные особенности БМК и обеспечивают высокий коэффициент заполнения поля БМК. До изготовления образцов микросхем проект БМК может быть прототипирован средствами имитатора БИС. Данный подход реализован в технологии проектирования БМК–ПЛИС–БМК.

Серии БМК 5503, 5507, 5521, 5528, 5529 имеют единую библиотеку функциональных ячеек, включающую все группы ячеек, реализуемых в рамках БМК, удобную для пользователя систему обозначений, отражающую функциональное назначение ячеек. Схемотехническая реализация библиотечных ячеек обеспечивает их работоспособность независимо от условий применения и учитывает конструктивные особенности БМК.

Библиотека функциональных ячеек [7] содержит:

- 1) библиотеку базовых ячеек (состоит из 275 элементов) с основными группами логических и триггерных ячеек, периферийными ячейками, обеспечивающими функции входа, выхода и входа/выхода цифровых и аналоговых сигналов, а также пассивное или активное доопределение внешнего контакта;
- 2) библиотеку цифроаналоговых ячеек из 28 элементов, позволяющих реализовать аналого-цифровую обработку сигналов в поле БМК;
- 3) библиотеку специальных ячеек, разработанных для конкретных применений различных заказчиков.

Благодаря использованию библиотеки цифроаналоговых ячеек, помимо низкой потребляемой мощности, высокой надежности БМК, имеется возможность объединения цифровой и аналоговой обработки информации, что находит широкое применение в таких областях, как создание МЭМС-устройств.

Заключение. Серии БМК, разработанные в НПК «Технологический центр», широко применяются в аппаратуре космического и двойного назначения. На базе серий БМК 5503, 5507, 5521, 5528 и 5529 разработано более 600 типов микросхем, из которых более 200 поставляются серийно. Средства проектирования для серий 5503 и 5507 свободно распространяются (сайт www.asic.ru), что создает предпосылки для более широкого применения указанных серий.

Литература

1. **Басаев А.С., Гришин В.Ю.** Космическое приборостроение: главное – правильная концепция // Электроника НТБ. – 2009. – № 8. – С. 4–10.
2. **Денисов А.Н., Коняхин В.В., Якунин А.Н., Бец В.П.** Разработка аппаратуры космического применения с использованием базовых матричных кристаллов // Вестник корпорации Лавочкина. – 2012. – № 5. – С. 67–72.
3. **Малашевич Н.И.** Разработка методики интеграции ОЗУ в базовых матричных кристаллах космического назначения // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 6. – С. 50–52.
4. **Малашевич Н.И.** Реализация ячейки ОЗУ в составе КМОП БМК // Изв. вузов. Электроника. – 2013. – № 2 (100). – С. 89–90.
5. **Фёдоров Р.А., Малашевич Н.И.** Ячейка памяти статического оперативного запоминающего устройства // Патент Российской Федерации № 2507611. – Оpubл. 2014.
6. **Денисов А.Н.** Методология проектирования аппаратуры по технологии БМК–ПЛИС–БМК // Изв. вузов. Электроника. – 2009. – № 5 (79). – С. 85–87.
7. **Денисов А.Н., Фомин Ю.П., Коняхин В.В., Фёдоров Р.А.** Библиотека функциональных ячеек для проектирования ползуказных микросхем серий 5503 и 5507 / Под общ. ред. А.Н. Саурова. – М.: Техносфера, 2012. – 304 с.

Статья поступила
23 июня 2015 г.

Гаврилов Сергей Владимирович – начальник лаборатории разработки САПР НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* средства проектирования интегральных микросхем.

Денисов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории перспективной ЭКБ специального назначения НПК «Технологический центр» (г. Москва), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных технологий (НИЛ ИТ) МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка специализированных микросхем и средств их проектирования.

Коняхин Валерий Вячеславович – начальник отдела интегральных микросхем НПК «Технологический центр» (г. Москва), научный сотрудник НИЛ ИТ МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка базовых и базовых матричных кристаллов, а также средств проектирования специализированных микросхем.

Малашевич Наталья Иосифовна – младший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* проектирование и разработка цифровых и смешанных КМОП интегральных схем.

Фёдоров Роман Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории разработки аналого-цифровых БИС НПК «Технологический центр» (г. Москва), старший научный сотрудник НИЛ ИТ МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и разработка цифровых и смешанных КМОП интегральных схем.
E-mail: R.Fedorov@tcen.ru