

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗОВЫХ МАТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ



А.Н. Денисов*,
den@tcen.ru;
A.N. Denisov***



В.В. Коняхин*,
v.koniakin@tcen.ru;
V.V. Konyakhin***

Рассматриваются различные методологии проектирования электронной аппаратуры, уделяется особое внимание методологиям с применением базовых матричных кристаллов (БМК). Описываются серии БМК, доступных для использования при разработке аппаратуры специального назначения.

Ключевые слова: базовый матричный кристалл; БМК; ПЛИС; методология проектирования; телеметрия.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенная надёжность, минимальная масса и пониженное энергопотребление – важнейшие критерии, которыми руководствуется разработчик аппаратуры космического применения. Одним из основных способов оптимизации этих эксплуатационных параметров является применение специализированных микросхем.

Традиционно специализированные интегральные схемы (ASIC – Application-Specific Integrated Circuits) по способу изготовления и освоения в производстве разделяют на три большие группы:

- полностью заказные схемы, для которых требуется изготовление полного комплекта фотомасок, выполнение полного цикла обработки кремниевых пластин и проведение полного комплекса квалификационных испытаний;
- полужаказные схемы на основе БМК, для изго-

* НПК «Технологический центр», Россия, Московская область, г. Зеленоград.

** ОАО «НИИ «Компонент», Россия, Московская область, г. Зеленоград.

DEVELOPMENT OF SPACE APPLICATION DEVICES USING FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAY



А.Н. Якунин,
кандидат технических
наук, доцент**,
needcar@mail.ru;
A.N. Yakunin****



В.П. Бец,
кандидат технических
наук, доцент**,
betz@olvs.miee.ru;
V.P. Betz****

The article covers various techniques of electronics designing; special attention is given to techniques using the field programmable gate array (FPGA). FPGA families are described, available for special-purpose hardware development.

*Key words:
Field Programmable Gate Array;
FPGA;
EPLD;
design techniques,
telemetry.*

товления которых используются базовые пластины с заранее сформированными транзисторными структурами и частично сформированными слоями разводки, а сам процесс изготовления сводится к формированию одного или нескольких слоёв межсоединений, для чего требуется изготовление фотомасок только переменных слоёв. Квалификационные испытания проводятся только на этапе освоения БМК и для выпуска конкретных типов полужаказных микросхем не требуются;

- программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС), представляющие собой корпусированные микросхемы, специализация («зашивка») которых осуществляется не на производстве, а самим пользователем вне кремниевой фабрики путём замыкания или размыкания перемычек внут-

*** Scientific Production Company «Technology Center», Russia, Moscow region, Zelenograd.

**** JSC «NII Komponent», Russia, Moscow region, Zelenograd.

ри схемы с помощью специальных программно-аппаратных средств. Поэтому надёжность специализированных микросхем на ПЛИС определяется не только самой ПЛИС, но и надёжностью способа специализации каждой конкретной микросхемы.

Оптимальный выбор элементной базы для реализации аппаратуры зависит от множества факторов. Для аппаратуры космического применения, при всей важности экономических показателей, определяющими являются повышенная стойкость к внешним воздействующим факторам (ВВФ), высокая надёжность и долговечность, низкое энергопотребление, высокая функциональность, обеспечение разработки и поставки интегральных микросхем (ИС) в оговорённые сроки, длительный период поддержания производства данного типа ИС. При этом серийность специализированных микросхем крайне низка или может составлять сотни и даже десятки микросхем.

Принято считать, что полностью заказные микросхемы обеспечивают максимальную функциональность, надёжность 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 надёжность 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 надёжности, энергопотребления и стойкости к ВВФ они сравнимы с заказными ИС, в то же время по длительности цикла разработка → изготовление → испытания, сопоставимы с ПЛИС. Производство БМК, как правило, поддерживается в течение длительного времени (более 15 лет); производители предлагают заказчикам собственные библиотеки и технологии проектирования ИС, а также предоставляют услуги по прототипированию полузаказных микросхем. Зачастую оптимальным способом реализации аппаратуры космического применения является использование именно полузаказных ИС.

1. Особенности базового матричного кристалла

Базовый матричный кристалл – это универсальная заготовка для полузаказных ИС. В отличие от ПЛИС, структура БМК производится технологическим путём формированием слоёв металлизации. В структуре БМК отсутствуют избыточные элементы, обеспечивающие программирование электрической схемы, что значительно снижает общую сложность микросхемы, повышая её надёжность. Использование полузаказных микросхем обеспечивает следующие преимущества:

- повышение надёжности изделия за счёт более высокой надёжности БИС по сравнению с дискретными элементами;
- сокращение габаритов аппаратуры за счёт снижения количества используемых микросхем и умень-

шения размеров печатных плат;

- улучшение технических характеристик за счёт увеличения системного быстродействия и сокращения потребляемой мощности;
- возможность объединения в полузаказной микросхеме цифровой и аналоговой обработки информации;
- обеспечение защиты разработки от возможного несанкционированного воспроизводства.

Все наиболее дорогостоящие и длительные процедуры проектирования, производства и аттестации полузаказных ИС выполняются на этапе освоения БМК, разработка которого осуществляется с учётом жестких условий эксплуатации. Изготовление микросхем выполняется 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 (ТУ). В качестве документации на полузаказную ИС формируется карта заказа, которая является приложением к групповым ТУ, поэтому квалификационные испытания новой микросхемы не проводятся.

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

2. Методологии проектирования бортовой аппаратуры

Разработка современной бортовой аппаратуры космического аппарата – сложный и длительный процесс, в ходе которого решаются системные и технические задачи, выполняется проектирование специализированной элементной базы, отрабатываются алгоритмы функционирования, интерфейсы и взаимодействие блоков в составе КА, разрабатываются конструкция и печатные платы, тестируется программное обеспечение и т.д. При этом используются определённые принципы, методики, способы и маршруты проектирования, позволяющие реализовать необходимые схемотехнические решения с помощью программных или аппаратных средств. Поэтому процесс разработки аппаратуры можно назвать методологией проектирования.

2.1. Методология проектирования, основанная на использовании только стандартных компонентов

Традиционно методология проектирования специализированной аппаратуры с применением стандартных компонентов базировалась на микросхемах малой и средней степени интеграции, а также дискретных компонентах. Разработчик мог использовать серийно выпускаемые разрешённые к применению в

специальной аппаратуре микросхемы и дискретные компоненты, функциональные возможности которых были невелики. Хотя методология проектирования на стандартных компонентах имела существенные ограничения, связанные с функциональными возможностями элементной базы и с тем, что программные средства проектирования были недостаточно развиты, она заложила принцип ориентации на серийный образец, его технологичность и тестопригодность, а также на выполнение всего цикла разработки макетного, опытного и серийного образцов в рамках единой компонентной базы, что позволяло эволюционно построить процесс разработки новых изделий.

2.2. Методология проектирования, основанная на применении базовых матричных кристаллов

Следующим шагом в развитии методологии разработки аппаратуры стала разработка аппаратуры с применением БМК (Денисов А.Н., 2009; Басаев А.С. и др., Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, 2008). Традиционная технология разработки полужаказных микросхем на основе БМК предполагает моделирование поведения микросхемы специальными программными средствами и конечную проверку правильности функционирования микросхемы в аппаратуре после её изготовления. Разработка выполняется на основе отработанных методов, средств и маршрутов проектирования и ориентирована на получение годных микросхем уже при первом изготовлении. Это обеспечивается высокими требованиями к тестируемости и к качеству проектирования, что гарантируется средствами системы автоматизированного проектирования (САПР), которые учитывают специфику конкретных серий БМК и технологию их изготовления.

2.3. Методология проектирования, основанная на применении программируемой логической интегральной схемы, с последующей заменой на базовый матричный кристалл (ПЛИС→БМК)

Основными недостатками методологии разработки аппаратуры с применением БМК являются относительно длительный цикл изготовления полужаказных микросхем и невозможность исследования проектов микросхем в аппаратуре, что, как правило, ведёт к многократным коррекциям и повторным изготовлением микросхем в процессе разработки изделия. Поэтому появление ПЛИС, позволяющих легко выполнять коррекцию проекта специализированной ИС непосредственно в аппаратуре, стало новым шагом в развитии методологии разработки аппаратуры. Попыткой совместить преимущества разработки аппаратуры с применением ПЛИС с одновременным обеспечением высоких эксплуатационных и надёжных характеристик стала методология ПЛИС→БМК, которая пред-

полагает отработку макетных образцов аппаратуры на ПЛИС с последующей их заменой на БМК. Эта обеспечивает рекордно короткий проектно-технологический цикл, минимальные затраты на проектирование, высокую гибкость при модификации аппаратуры. При этом весь проектно-технологический цикл выполняется разработчиком РЭА на одном рабочем месте.

Несмотря на то, что применение методологии разработки аппаратуры ПЛИС→БМК предоставляет возможность отработки проекта микросхемы средствами ПЛИС в составе аппаратуры, из-за конструктивных нюансов ПЛИС и особенностей библиотек элементов не всегда обеспечивается гарантированный переход от проекта в базе ПЛИС к проекту в базе БМК, что может привести к необходимости перепроектирования и повторного изготовления ИС.

2.4. Методология проектирования с использованием имитатора базового матричного кристалла

Следующим шагом в развитии методологии проектирования стала методология проектирования БМК на ПЛИС→БМК, разработанная и реализованная специалистами НПК «Технологический центр» (г. Зеленоград) на базе лицензионно чистой САПР «Ковчег». Методология основана на прототипировании микросхем с использованием имитаторов БМК (рисунок 1) (Денисов А.Н. и др., 2004). Конструкция имитаторов представляет собой микромодуль, в нижней части которого располагается ПЛИС в микрокорпусе, а в верхней части расположено ПЗУ и реализована схема загрузки ПЛИС. Тип ПЛИС соответствует объёму имитируемого БМК. ПЗУ обеспечивает возможность загрузки в ПЛИС логической модели прототипируемого проекта ИС. На нижней печатной плате расположены выводы, соответствующие выводам БМК. Размер печатной платы соответствует размеру корпуса, в котором выпускаются БМК. Расположение внешних выводов имитаторов полностью соответствует расположению выводов БМК.

Данная методология позволяет в короткие сроки выполнить разработку и отладку макетного образца с использованием имитаторов БМК на основе ПЛИС, а при переходе к опытному образцу обеспечивает быструю и гарантированную реализацию изделия на отечественной элементной базе в базе БМК.

Можно выделить четыре основных принципа, которые лежат в основе методологии разработки БМК

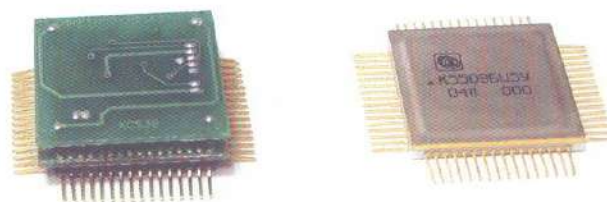


рисунок 1. Имитатор БМК на ПЛИС и БМК

на ПЛИС→БМК:

1) ориентация на отечественную элементную базу, разрешённую к применению в аппаратуре специального назначения;

2) получение годных образцов микросхем с первой попытки;

3) применение оригинальной библиотеки элементов, учитывающей специфику БМК и ориентированной на методы бездефектного проектирования;

4) прототипирование микросхем, позволяющее провести исследования и испытания микросхемы средствами имитатора микросхем на ПЛИС в составе реальной аппаратуры до изготовления ИС в базисе БМК.

Таким образом, методология БМК на ПЛИС→БМК объединяет в себе преимущества методологий БМК и ПЛИС→БМК.

3. Серии базовых матричных кристаллов, доступных для использования при разработке аппаратуры специального назначения

В связи с тем, что в настоящее время существует высокая потребность в специализированных микросхемах для различной аппаратуры аэрокосмического, научного, военного назначения, систем связи и промышленной автоматики (*Басаев А.С. и др.*, 2009), НПК «Технологический центр» (г. Зеленоград) предоставляет полный комплекс услуг по разработке и производству БМК и специализированных ИС на их основе. На сегодняшний день разработаны семейства серий БМК, имеющих унифицированную библиотеку базовых и типовых функциональных ячеек, единые средства проектирования на базе САПР «Ковчег» и средства прототипирования микросхем (*Басаев А.С. и др.*, Петербургский журнал электроники, 2008).

• **Серии БМК 5503 и 5507** (таблица 1) имеют следующие особенности:

- радиационно-стойкая КМОП-технология 1,5 мкм на объёмном кремнии;
- планарные металлокерамические корпуса с шагом выводов 1,0 мм.

Эти серии освоены в производстве с приёмкой «ВП» и разрешены к применению в аппаратуре специального назначения.

На базе БМК серий 5503 и 5507 уже разработано и выпускается более 400 полуказанных микросхем

различного назначения (контроллеры, интерфейсные ИС, приёмопередатчики, ИС трансформаторной развязки), в том числе для космической аппаратуры, например для космических кораблей «Прогресс-М» (25 запусков), «Союз-ТМА» (18 запусков), разгонного блока «Бриз-М» (39 запусков) и др. Примеры некоторых специализированных схем приведены по адресу <http://www.asic.ru/bistrans.html#1>.

• **Серии БМК на структурах «кремний на изоляторе» 5508** (номинальное напряжение питания 5 В) и **5509** (номинальное напряжение питания 3 В) имеют следующие особенности:

- радиационно-стойкая КМОП-технология 1,0 мкм;
- три типа объёмом от 7 до 35 тысяч условных вентилей;
- количество внешних выводов: 68, 100, 144;
- планарные металлокерамические корпуса с шагом выводов 0,5 мм;
- рабочая частота до 100 МГц.

Сравнительные характеристики БМК серии 5509 и 5503 приведены в таблице 2.

Экспериментальные образцы микросхем на БМК серии 5509 были изготовлены в 2007 году в ОАО «НИИМЭ и Микрон». Испытания микросхем на радиационную стойкость были проведены в НПО СПЭЛС и показали следующие результаты:

1. Уровень стойкости к воздействию фактора с характеристикой 7.Иб составляет не менее 2·5Ус, при этом катастрофических отказов и тиристорного эффекта не наблюдается.

2. Уровень стойкости БИС определяется нормой на параметр «статический ток потребления». В результате воздействия фактора с характеристикой 7.И7 ток потребления БИС К5509БЦ8У монотонно снижался до уровня $(1,6 \dots 2) \cdot 10^6$ ед. Далее происходил плавный рост тока потребления. Наблюдалось изменение выходных уровней в пределах 0,3 В.

Приведённые данные подтверждены при испытаниях экспериментальных образцов, изготовленных в ОАО «Ангстрем» в 2011 году в рамках госконтракта № 07.542.12.4011 на оборудовании ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

• **Серия БМК повышенной стойкости к специальным факторам на структурах «кремний на изоляторе»:**

- радиационно-стойкая КНИ КМОП-технология

таблица 1 – Основные характеристики БМК серий 5503 и 5507

тип БМК	количество условных вентилей 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

таблица 2 – Сравнительные характеристики БМК серий 5509 и 5503

параметр	серии БМК	5509	5503
напряжение питания, В		от 2,7 до 5,5	от 4,5 до 5,5
максимальная частота, МГц		100	30
объём поля БМК, условных вентиляей		30000	5500
значение статического потенциала, В		>2000	>2000
устойчивость к фактору 7И6(И2)		2·5Ус(3У)	(5·2У)
устойчивость к фактору 7И7(И3)		6Ус(3У)	(2У)
устойчивость к фактору 7С4(С32)		5Ус	(1У)
устойчивость к фактору 7К1(К1)		0,5·2К	(2·1У)
устойчивость к фактору 7К4(К3)		0,5·2К	(0,5·1У)

0,25 мкм, разрабатываемая на производстве ОАО «НИИМЭ и Микрон»;

- объём: 100, 200, 500 и 1000 тысяч условных вентиляей;
- количество внешних выводов до 240;
- конструкция контактных площадок предназначена для двух кратной разварки с целью аттестации кристаллов микросхем для последующего использования в многокристалльных модулях.

К настоящему времени получены экспериментальные образцы.

• **Серия БМК для сбое-отказоустойчивой аппаратуры:**

- радиационно-стойкая КМОП-технология 0,25 мкм, разрабатываемая на производстве ОАО «НИИМЭ и Микрон»;
- поле БМК конструктивно состоит из четырех независимых по питанию областей объёмом 100 и 250 тысяч условных вентиляей каждая, что позволяет реализовать системы с мажорированием и «холодным резервом»;
- количество внешних выводов до 600;
- конструкция контактных площадок предназначена для двух кратной разварки с целью аттестации кристаллов микросхем и последующего использования в многокристалльных модулях.

ОКР по разработке данной серии открывается в 2012 году.

4. Обеспечение качества полузаказных микросхем

Качество полузаказных ИС закладывается на этапе освоения серии БМК и последующей разработки проекта микросхемы. Все этапы разработки подтверждаются испытаниями. Так, стадия освоения БМК завершается квалификационными испытани-

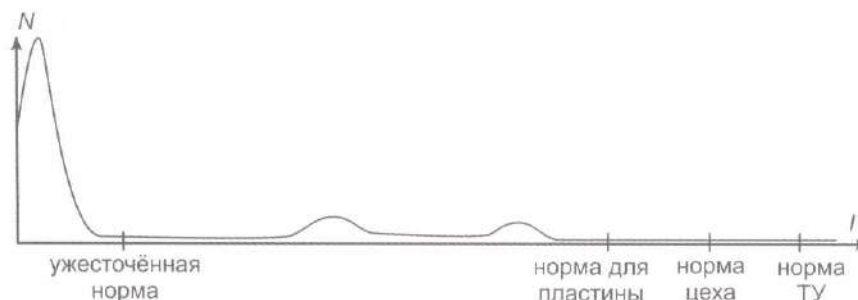
ями, которые распространяются на все типы ИС на основе данного БМК. Характеристики микросхем подтверждаются периодическими испытаниями. В процессе производства все микросхемы проходят отбраковочные и приёмсдаточные испытания. Кроме того, каждая партия базовых пластин проходит аттестацию на стойкость к специальным ВВФ, для чего изготавливаются партии тестовых микросхем, которые и подвергаются испытаниям на радиационную стойкость.

В процессе изготовления осуществляется контроль электрических параметров в составе пластины, по нормам цеха и по нормам ТУ при приёмсдаточных испытаниях. Традиционно нормы ТУ ужесточаются на две погрешности измерительного прибора при измерении по нормам цеха и на три погрешности – при разбраковке пластин. Это позволяет осуществить отсев потенциально ненадежных микросхем в процессе производства.

Распределение параметров микросхем в рамках производственной партии соответствует нормальному распределению с несколькими экстремумами. Типичное распределение для тока потребления микросхем серии 5503 приведено на рисунке 2.

С целью повышения качества выпускаемых микросхем в НПК «Технологический центр» введены таблицы норм электрических параметров микросхем, которые позволяют при разбраковке в составе пластин и при первом измерении после сборки провести отсев потенциально ненадежных микросхем за счёт резкого сужения границ отбраковки (таблица 3).

Измерения на пластине проводятся на шлейфе с контактирующим устройством, которое вносит дополнительную погрешность в результат измерения. Поэтому нормы разбраковки при первом измерении после сборки ещё более ужесточены. По токам утечки и токам потребления ужесточение норм разбра-



рисунк 2. Типичное распределение микросхем серии 5503 по значениям тока потребления

таблица 3 – Значения ужесточённых норм электрических параметров для БМК 5503

параметр	на пластине		после сборки		по ТУ	
	не менее	не более	не менее	не более	не более	не более
ток потребления, мкА		15		8		150
ток утечки высокого и низкого уровня, нА	-20	40	-5	15		±300
выходное напряжение низкого уровня, В		0,18		0,15		0,4
выходное напряжение высокого уровня, В	4,3		4,35		4,0	



рисунок 4. Структурная схема модуля датчиков

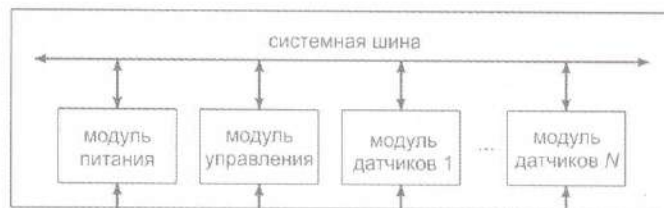


рисунок 3. Структурная схема телеметрической системы

ковки соответствует 18-кратному запасу.

Указанные в таблице параметры позволяют проверить периферийные ячейки микросхемы и выявить находящиеся в них дефекты. Кроме этого, измеряется динамический ток потребления микросхемы при функционировании, который обеспечивает контроль наличия дефектов в элементах поля БМК. Изготовленная по этим нормам партия микросхем состоит из однородных по электрическим параметрам микросхем.

Введение ужесточённых норм позволило провести анализ возможных причин повышения значений контролируемых параметров и выявить критические технологические процессы и операции. Их оптимизация привела к стабилизации выходных параметров микросхем.

закключение

ОАО «НИИ «Компонент» занимается разработкой телеметрической системы (ТМС) для космического аппарата, разрабатываемого ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». ТМС разрабатывается с использованием модульного принципа, структурная схема ТМС приведена на рисунке 3. В системе разработчики планируют использовать два типа БМК с преимущественно аналоговым содержимым – для модулей датчиков и одну цифровую БМК – для модуля управления.

В связи с тем, что телеметрическая система опрашивает множество разнотипных датчиков, целесообразно применять несколько типов БМК, так как, используя БМК каждого типа в разных количествах, можно добиться произвольных соотношений типов опрашиваемых датчиков. В нашем случае в модуле датчиков используется два типа БМК (рисунок 4).

Для повышения надёжности телеметрии в схемотехнике обработки информации модулей датчиков реализован холодный резерв, который подразумевает увеличение аппаратных затрат в два раза. Поэтому каждый тип БМК будет применён дважды. В модуле управления будет использоваться горячий резерв, при котором реализуются схемы управления трижды.

Достоинствами использования предложенного решения являются:

- высокая стойкость к ВВФ;
- наличие серии 5503 в перечне МОП 44 001.02-2011 («Перечень электрорадиоизделий, разрешённых к применению при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации аппаратуры, приборов, устройств и оборудования военного назначения»);
- сокращение сроков поставки элементов на один порядок (по сравнению с импортной радиационно-стойкой элементной базой);
- сокращение стоимости элементов на два-три порядка (по сравнению с импортной радиационно-стойкой элементной базой);
- применение отечественной элементной базы.

список литературы

Басаев А.С., Гришин В.Ю. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция // Электроника, 2009. № 8. С. 4-10.

Басаев А.С., Денисов А.Н., Коныхин В.В., Мальцев П.П. Методология проектирования радиационно-стойких микросхем на основе БМК для космических аппаратов // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008». Истра, 12-16 октября 2008. 8 с.

Басаев А.С., Денисов А.Н., Коныхин В.В., Мальцев П.П. Специализированные интегральные микросхемы космического применения на основе базовых матричных кристаллов // Петербургский журнал электроники, 2008. № 1. С. 34-39.

Денисов А.Н. Методология проектирования аппаратуры по технологии БМК-ПЛИС-БМК // Известия ВУЗов. Электроника, 2009. № 5. С. 85-86.

Денисов А.Н., Шеленин Н.А. Обеспечение качества РЭА на этапе проектирования специализированной ЭКБ // Петербургский журнал электроники, 2004. № 3-4. С. 169.

Статья поступила в редакцию 22.03.2012 г.