

Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков

Олег Дворников, Владимир Чеховский, Валентин Дятлов (г. Минск, Беларусь), Николай Прокопенко (г. Шахты, Ростовская обл.)

В статье проанализированы способы реализации специализированных аналоговых микросхем для интерфейсов датчиков. Рассмотрены расположение и структура ячеек, особенности трассировки межсоединений в базовых структурных кристаллах типа VCA фирмы Triad Semiconductor (США).

Как известно [1–3], различие параметров и условий эксплуатации датчиков приводит к необходимости использования разнообразных схем интерфейсов. В ряде случаев серийно выпускаемые микросхемы интерфейсов не удовлетворяют разработчиков систем по уровню параметров, например по отсутствию радиационной стойкости, поэтому проектирование и мелкосерийное производство специализированных аналоговых микросхем для датчиков является актуальным.

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ

В настоящее время не существует метода проектирования, гарантирующего высокий уровень технических характеристик ИС и одновременно малую себестоимость при серийном производстве, сжатые сроки и невысокие затраты на выполнение разработки. Каждый из методов проектирования имеет свои преимущества и недостатки, и выбор метода в значительной степени зависит от предполагаемых объёмов производства ИС.

Можно выделить три основных направления реализации специализированных аналоговых ИС [4]:

1. Заказные ИС, разрабатываемые на уровне активных и пассивных элементов с привлечением, при необходимости, ранее апробированных узлов и блоков или функционально завершённых блоков и макроблоков, т.н. IP-компонентов;
2. Полузаказные ИС (программируемые изготовителем) на базовых матричных кристаллах (БМК) и базовых структурных кристаллах (БСК);

3. Программируемые потребителем аналоговые ИС (ПАИС).

При создании заказных ИС проектируют полный комплект шаблонов, что позволяет наиболее полно использовать возможности полупроводниковой технологии для получения требуемых параметров и максимально плотной упаковки. Это обеспечивает минимальные площадь и себестоимость кристалла при массовом производстве. Однако такой процесс требует значительных затрат на разработку, которые окупаются только при большой серийности продукции или при изготовлении высококачественных ИС для дорогостоящей аппаратуры.

Для уменьшения материальных затрат на подготовку производства и изготовление заказных микросхем часто используют следующие методы [5]:

- размещение на одном фотошаблоне и одновременное изготовление нескольких ИС, включая изделия, предназначенные для разных потребителей (Multy Project Wafer, MPW-метод);
- размещение на одном фотошаблоне топологий нескольких слоёв и поочерёдное использование разных участков фотошаблона при формировании разных слоёв (Multy Layer Mask, MLM-метод).

Однако применение методов MPW и MLM приводит к взаимозависимости изготовления различных микросхем, что недопустимо для ряда отраслей промышленности (ракетно-космической и военной техники, ядерной энергетики и др.).

Концепция БМК заключается в предварительном изготовлении полупроводниковых пластин со сформированной матрицей несоединённых базовых ячеек, а также необходимо наличие библи-

отеки стандартных элементов и комплекса программ для схемотехнического и топологического проектирования полузаказных ИС [4, 6].

Каждая базовая ячейка состоит из отдельных активных и пассивных элементов, соединения между которыми выполняют на предприятии-изготовителе ИС (в т.н. кремниевой мастерской). Программирование БМК осуществляется формированием дополнительных технологических слоёв межсоединений (металлизации) и межслойных контактов. Для этого необходимо разработать и изготовить дополнительные шаблоны, количество которых гораздо меньше, чем для заказных ИС.

Библиотека элементов содержит всю необходимую для проектирования информацию, а именно: схему электрическую принципиальную, результаты измерений или моделирования параметров, топологические чертежи. В значительной степени состав библиотеки определяется экспертным путём и включает те элементы, которыми привыкли оперировать разработчики аналоговых систем на основе ИС малой и средней степени интеграции. Элементы библиотеки спроектированы для конкретного БМК, поэтому топологические чертежи содержат только слои специализации, и применение элементов библиотеки возможно в БМК с одинаковой структурой ячейки.

Библиотека элементов и комплекс программ доступны потребителям, поэтому проектирование полузаказной ИС может осуществляться как в центре проектирования (дизайн-центре), так и на предприятии, разрабатывающем аппаратуру на уровне элементов БМК и/или элементов библиотеки, но изготовление ИС всегда происходит в кремниевой мастерской.

Универсальность БМК обуславливает их широкое распространение. Так, в настоящее время изготовление аналоговых микросхем возможно на основе следующих БМК [6]:

- НПО «Автоматики», содержащем биполярные n-p-n транзисторы с граничной частотой $f_T > 0,8$ ГГц,

p-n-p с $f_T > 0,6$ ГГц, металлические резисторы и МОП-конденсаторы;

- «Руль» 5515ХТ ОАО «Ангстрем», выполненном по БиКМОП-технологии с $f_T > 1,5$ ГГц/n-p-n и $f_T > 0,5$ ГГц/p-n-p;
- K1451BK1У, созданном по КМОП-технологии дизайн-центром «Союз» и ОАО «Ангстрем»;
- НБК1501Т, выполненном по КМОП-технологии на ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»;
- серии изделий ОАО НИИТАП, в том числе аналоговых БМК «Сигналист» ($f_T < 2,5$ ГГц/n-p-n и $f_T < 1,5$ ГГц/p-n-p), «Старт» ($f_T < 0,9$ ГГц/n-p-n и $f_T < 0,1$ ГГц/p-n-p) и «Лидер» ($f_T < 3,0$ ГГц/p-n-p и $f_T < 0,15$ ГГц/p-n-p).

К сожалению, предлагаемые БМК не в полной мере удовлетворяют разработчиков аналоговых интерфейсов датчиков, поскольку они:

- содержат большое количество КМОП-элементов, применение которых в аналоговых устройствах ограничено из-за высокого уровня низкочастотных шумов и вносимых статических погрешностей [4];
- используют избыточные для ряда применений конструктивные решения, увеличивающие стоимость изготовления полупроводниковых кристаллов;
- не содержат активных элементов, позволяющих реализовать маломощные аналоговые устройства.

Основное отличие БСК от БМК заключается в том, что в БСК некоторые соединения элементов выполнены заранее. Таким образом, структурные ИС представляют собой спроектированную и изготовленную полупроводниковую пластину, обычно содержащую блоки памяти, интерфейс ввода-вывода, функциональные аналоговые блоки и матрицу несоединённых элементов. Для специализации БСК также используются дополнительные шаблоны, но проектирование выполняется на уровне блоков. При этом часто указывают, что БСК имеют структуру «море модулей» по сравнению с «морем вентиляей» во многих БМК.

Использование в БСК и БМК ранее апробированных блоков уменьшает риск проектирования и снижает требования к квалификации разработчиков ИС, а наличие почти полностью сформированных полупроводниковых пластин сокращает время изготовления полузаказных ИС. Кроме того, исходные пластины БМК и БСК изготавли-

ваются массовым способом, что уменьшает их себестоимость.

По способам специализации ПАИС [7, 8] подобны широко известным программируемым логическим ИС (ПЛИС), т.к. задание требуемых функций осуществляется потребителем программным путём, без участия кремниевой мастерской и дизайн-центра. Наиболее известными ПАИС являются iSPAC компании Lattice Semiconductor, FPAAD компании Fast Analog Solution и FPAА компании Anadigm.

При минимальных затратах ПАИС обеспечивают максимальную гибкость проектирования, в частности, быструю специализацию требуемых функций, программное изменение характеристик, возможность неоднократного перепрограммирования. Это уменьшает риск проектирования, позволяет экспериментально исследовать несколько вариантов одного изделия, предоставляет уникальную возможность получения отличающихся функций и/или параметров в различные моменты времени на одной и той же ИС путём перезагрузки управляющей информации.

Недостатком всех программируемых ИС является низкая экономическая эффективность при средней и большой серийности выпуска, что связано с 3–5-кратной избыточностью их элементов [9]. Универсальность ПАИС затрудняет, а во многих случаях исключает реализацию прецизионных аналоговых характеристик. Даже основное преимущество (возможность многократного перепрограммирования) может ограничить их применение в жёстких условиях эксплуатации, так как допускает появление дефектов в виде самопроизвольного изменения внутренних связей. Таким образом, на ПАИС целесообразно выполнять макетирование аналогового интерфейса для отработки требуемого функционирования.

Необходимо также учитывать, что стоимость зарубежных программируемых ИС для жёстких условий эксплуатации в десятки-сотни раз превышает стоимость аналогичных ИС коммерческого исполнения, а их применение в ряде изделий специального назначения ограничено нормативными документами [10].

ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ БСК

По мнению ряда зарубежных специалистов, проектирование полуза-

казных микросхем на БМК, выполненных по КМОП-технологии, в большинстве случаев не позволило достичь высокого уровня параметров аналоговых устройств, хотя для цифровых изделий оказалось вполне успешным. Такая ситуация объясняется тем, что характеристики аналоговых схем КМОП в большой степени определяются выполнением топологии [11]. Поэтому БСК, в которых аналоговые ячейки разработаны по правилам проектирования заказных схем, имеют преимущество перед КМОП БМК.

Из серийно выпускаемых БСК следует выделить:

- аналого-цифровые БСК фирмы Gigortix, содержащие до 500 полностью сформированных (с металлом) ячеек входа/выхода, логические вентили, память и др. [12];
- XPressArray-II (ХРА-II) фирмы ON Semiconductor, изготовленный по технологии фирмы AMI Semiconductor, в том числе для военных применений (М-ХРА-II). Такие БСК предназначены для перевода проектов, выполненных на ПЛИС типа Altera APEX-II и Stratix, Xilinx Virtex-II, в полузаказные ИС [13];
- цифровой БСК фирмы Faraday, содержащий сформированные и программируемые металлом блоки. В числе сформированных блоков – ОЗУ, логические вентили, блоки дискретного преобразования Фурье, сдвиговые регистры, устройства самотестирования, JTAG периферийное сканирование, высокоскоростные ячейки ввода/вывода и IP-блоки. Логические вентили, триггеры и структуры высокого уровня могут быть сконфигурированы для получения требуемых системных функций [14];
- радиационно-стойкий аналого-цифровой БСК ViArray фирмы Sandia, в котором требуемая конфигурация системы реализуется изменением фотошаблона межуровневого контакта и одного металла [15, 16]. Кристалл содержит следующие аналоговые, смешанные и пассивные элементы: 8 АЦП двух типов, восемь 8-разрядных ЦАП, девять 32-канальных мультиплексоров, 48 ОУ общего назначения, 64 компаратора, 128 аналоговых ключей, 4 ИОН, высокоскоростное УВХ, 2 температурных датчика, матрицу резисторов с сопротивлением 2 кОм, матрицу МОП-конденсаторов с ёмкостью 2 пФ.

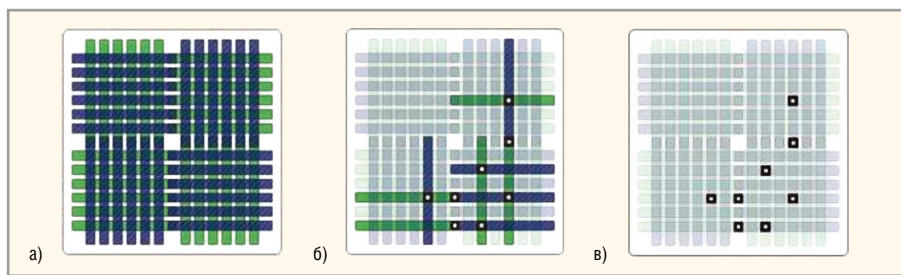


Рис. 1. Трассировка межсоединений на БСК типа VCA:

а – расположение неизменяемых проводников в слоях металл 2 и металл 3; б – формирование межсоединений элементов путём выполнения контактов между слоями металл 2 и металл 3; в – проектируемые контакты между слоями

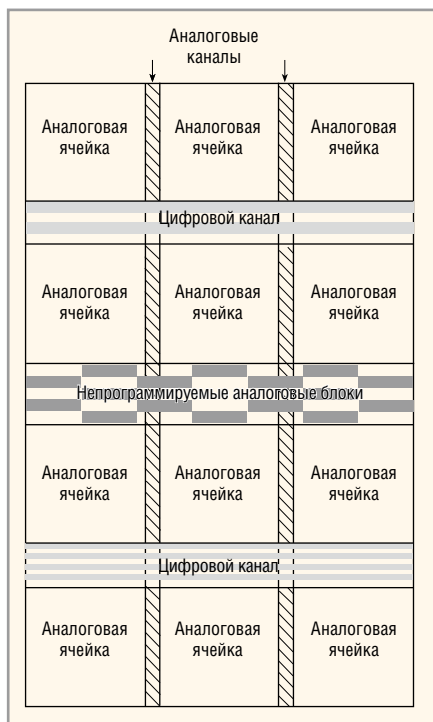


Рис. 2. Расположение ячеек в БСК типа VCA

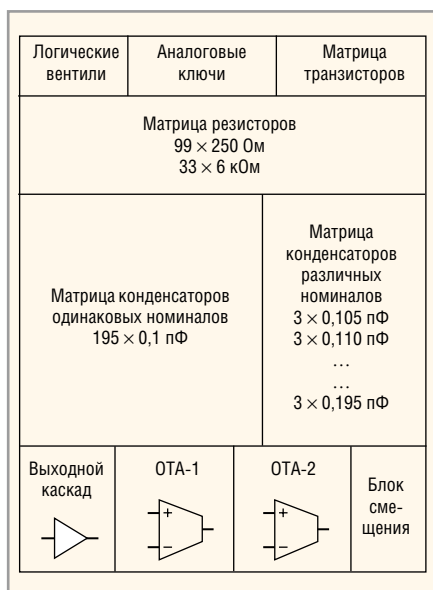


Рис. 3. Расположение компонентов и элементов в аналоговой ячейке БСК типа VCA
OTA – дифференциальный преобразователь напряжение-ток (усилитель типа OTA)

Наиболее ориентированными на изготовление аналоговых устройств являются БСК серии VCA (Via-Configurable Analog) фирмы Triad Semiconductor [17, 18]. Технологический маршрут изготовления VCA обеспечивает формирование четырёх металлов. Структура межсоединений во втором и третьем металле не программируется и показана на рисунке 1. Токпроводящие шины во втором и третьем металле поочерёдно повернуты на 90° для минимизации длины проводников, соединяющих компоненты и элементы БСК. Неиспользуемые проводники могут быть задействованы для экранирования.

Аналоговая часть БСК выполнена из нескольких аналоговых ячеек (см. рис. 2). Каждая ячейка (см. рис. 3) содержит несколько компонентов, обычно используемых в аналоговых микросхемах:

- два дифференциальных преобразователя напряжение-ток (Operational Transconductance Amplifier, OTA-1 и OTA-2 на рисунке 3);
- выходной каскад, который вместе с OTA-усилителем образует ОУ;
- матрицу конденсаторов и резисторов;
- аналоговые ключи;
- матрицу транзисторов;
- логические вентили.

Такая структура аналоговой ячейки оптимальна для создания фильтров разных типов, в том числе на переключаемых конденсаторах. На рисунке 2 показана матрица из 12 аналоговых ячеек, каждая из которых ориентирована таким образом, что логические вентили и аналоговые ключи находятся напротив цифровых каналов, которые используются для передачи управляющих сигналов от цифровой части. В центре матрицы расположены непрограммируемые аналоговые блоки, часто

применяемые в ИС, например, ИОН, АЦП и др.

Конструкция серии кристаллов VCA защищена патентами США. Серия содержит следующие аналого-цифровые изделия: VCA-1 – VCA-12, Mocha-1, TSX1001 и RF-VCA. При этом для создания интерфейсов датчиков наиболее пригодны кристаллы VCA-3, 4, 5, 8 и 12.

Кристалл типа VCA-4 изготовлен по КМОП технологическому процессу фирмы AMS с проектной нормой 0,35 мкм и включает 6 маломощных аналоговых ячеек, имеющих дифференциальный вход и парафазный выход; 6 маломощных малошумящих аналоговых ячеек с однофазным выходом; 12 ячеек с широкополосными, малошумящими ОУ; 1 маломощный источник, задающий режимы работы аналоговых устройств; ячейку с высокоомными сопротивлениями; два 10-разрядных цифровых потенциометра; датчик температуры; маломощную логику и электрически стираемое программируемое ПЗУ (ЭСП ПЗУ). К особенностям VCA-4 можно отнести невысокое (3,3 В) допустимое напряжение питания аналоговых блоков, которое не позволяет увеличить отношение сигнал/шум и затрудняет обработку сигналов чувствительных элементов.

Кристаллы VCA-3, 5, 8 содержат один тип аналоговой ячейки и различаются, главным образом, функциональными возможностями, обобщёнными в таблице. Они изготовлены по КМОП технологическому процессу фирмы IBM с проектной нормой 0,18 мкм, который обеспечивает работу аналоговых блоков с напряжением питания в диапазоне от 2,6 до 5 В. При этом ОУ характеризуется площадью усиления 50 МГц, обрабатывает входной сигнал, близкий к напряжению питания, и позволяет программировать уровень шумов, нагрузочную способность и полосу пропускания.

Кристалл малой площади VCA-12 изготовлен по КМОП-технологии фирмы ITAR с проектной нормой 0,18 мкм и допускает работу с повышенными (до 12 В) напряжением питания и током нагрузки. Расположение ячеек в VCA-12 поясняет рисунок 4. Кристалл содержит:

- 14 OTA-усилителей с однофазным выходом, напряжением питания 5 В, частотой единичного усиления до 20 МГц и током потребления

в спящем режиме около 1 нА (входят в ячейки 5V OP AMP Tile и Dual OTA Tile на рисунке 4); 8 выходных каскадов с напряжением питания 5 В (в ячейке 5V OP-AMP Tile), которые могут быть соединены с ОТА-усилителями для реализации ОУ с высокой нагрузочной способностью; 5 ОТА- усилителей с однофазным выходом, напряжением питания 12 В и частотой единичного усиления до 10 МГц;

- 600 конденсаторов с низким рабочим напряжением (5 В) и ёмкостью каждого 0,1 пФ; 138 конденсаторов с высоким рабочим напряжением (12 В) и ёмкостью 0,1; 0,2; 0,4 пФ, суммарная ёмкость высоковольтных конденсаторов составляет 25,2 пФ;
- 520 резисторов по 5 кОм, 400 резисторов по 50 кОм;
- 2116 несоединённых МОП-транзисторов с различным отношением ширины затвора к его длине, в том числе 48 n-МОП с рабочим напряжением 12 В и 136 – 5 В; 63 p-МОП с рабочим напряжением 12 В и 136 – 5 В;
- 160 ключей с рабочим напряжением 5 В и сопротивлением в замкнутом состоянии 1 кОм; 48 ключей с рабочим напряжением 5 В и сопротивлением 0,4 кОм. Ключи могут быть запрограммированы для выполнения функций логических вентилялей, однополюсных переключателей на два направления и триггеров Шмитта;
- изменяемые элементы входа/выхода: 88 аналоговых элементов с возможностью подключения последовательных резисторов с сопротивлением 0, 50 Ом и 1500 Ом; 25 цифровых элементов;
- 5000 логических вентилялей.

В последнее время фирмы Triad и Sandia начали совместные работы по созданию радиационно-стойкого БСК для аэрокосмических и военных применений на основе наработок Triad в серии VCA и КМОП технологического маршрута типа кремний на изоляторе (Silicon on Insulator, SOI) с проектной нормой 0,35 мкм фирмы Sandia [19]. Библиотека цифровых устройств VCA уже адаптирована для изготовления на новом технологическом маршруте, и основные усилия сосредоточены на модернизации аналоговых блоков, в том числе:

- ячеек широкополосных ОУ, малошумящих ОУ, компараторов, аналого-

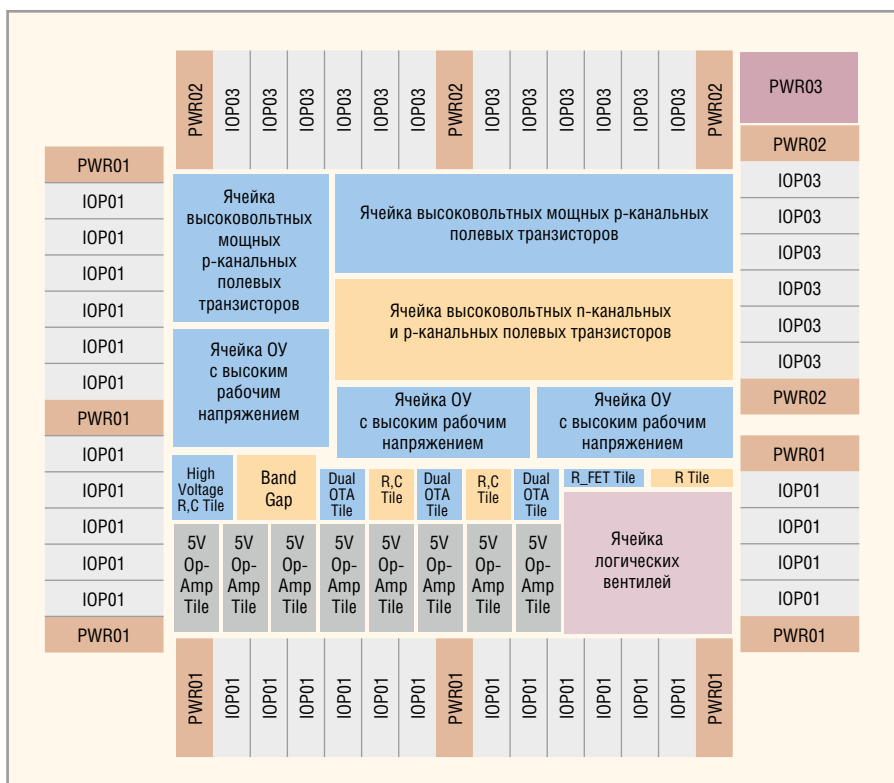


Рис. 4. Расположение ячеек БСК типа VCA-12

PWR01, PWR02, PWR03 – контактные площадки шин питания; IOP01, IOP03 – контактные площадки входа/выхода; 5V Op-Amp Tile – ячейка с ОУ, работающим при 5 В напряжении питания; High Voltage R,C Tile – матрица резисторов и конденсаторов с высоким рабочим напряжением; Bandgap – источник опорного напряжения, равного ширине запрещённой зоны; Dual OTA Tile – двоярный усилитель типа ОТА; R,C Tile – матрица резисторов и конденсаторов; R_FET Tile – ячейка ужатых резисторов; R Tile – ячейка резисторов

вых ключей и мультиплексоров, программируемых контактом матриц конденсаторов, программируемых контактом матриц резисторов;

- макроячеек инструментальных усилителей с программируемым уси-

лением, усилителей с цифровым управлением, пиковых детекторов, УВХ, 12- и 16-разрядных дельта-сигма АЦП, 10-разрядных ЦАП, 12-разрядных конвейерных АЦП, цифровых потенциометров;

Основные параметры кристаллов VCA-3, 5 и 8

Наименование компонентов, элементов, параметров	Количество в БСК		
	VCA-3	VCA-5	VCA-8
ОУ с однофазным выходом	28	32	28
ОУ с парафазным выходом	16	8	12
Аналоговые ключи	744	528	648
Логические вентиляли	56700	100800	151200
Программируемые ячейки ввода/вывода	124	160	160
ЦАП с переключением тока	0	5	0
Цифровые потенциометры	1	1	1
Резисторы	3030	2996	2582
Суммарное сопротивление всех резисторов, МОм	17,87	21,54	15,90
Сопротивление резисторов, кОм	0,7; 1,0; 6,5; 20		
Конденсаторы	4037	4250	3469
Суммарная ёмкость всех конденсаторов, пФ	625,8	614,8	542,6
Ёмкость конденсаторов, пФ	0,1; 0,5; 0,8; 1,0		
p-МОП транзисторы	334	524	270
n-МОП транзисторы	339	534	275
p-n-p транзисторы	81	81	0

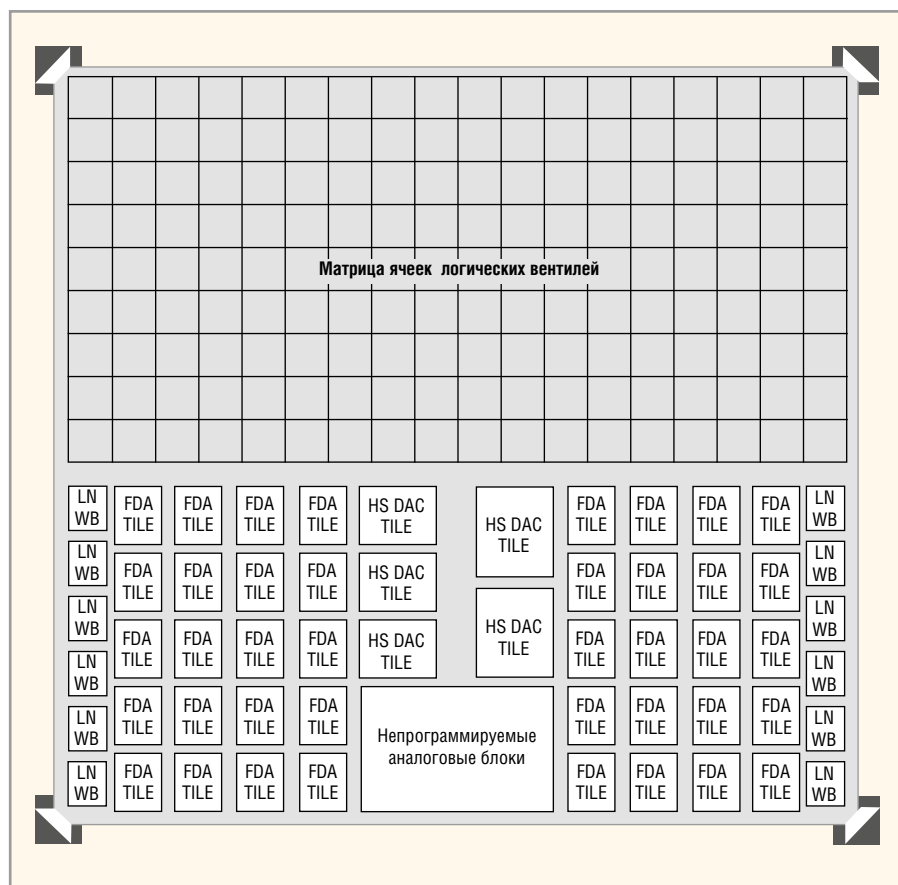


Рис. 5. Расположение ячеек в радиационно-стойком БСК

FDA TILE – аналоговая ячейка с парафазными входами/выходами
 HS DAC TILE – ячейка с высокоскоростным цифроаналоговым преобразователем
 LN WB – маломощный широкополосный усилитель

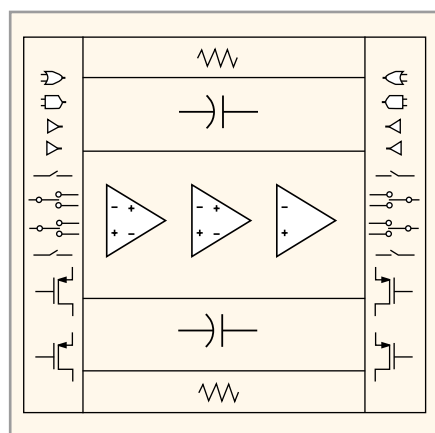


Рис. 6. Расположение компонентов и элементов в аналоговой ячейке типа «FDA Tile»

- функциональных блоков интерфейсов ёмкостных датчиков, фильтров на переключаемых конденсаторах, систем обработки данных.

На рисунке 5 показано расположение ячеек в аналого-цифровом, радиационно-стойком БСК. Предполагается, что он будет включать 162 логические ячейки (около 120 000 логических вентиляей); 40 аналоговых ячеек (Fully Differential

Analog Tile, FDA Tile на рисунке 5); 12 ячеек с маломощными широкополосными усилителями (Low Noise Wide-band, LN WB); 3 высокоскоростных ЦАП (HS DAC Tile); 2 высокоскоростных АЦП (HS ADC Tile); непрограммируемые аналоговые блоки – ИОН, медленные АЦП и ЦАП, а также АЦП и ЦАП с малой разрешающей способностью (менее 8 разрядов).

Основные аналоговые ячейки типа «FDA Tile» (см. рис. 6) позволяют создавать аналоговые устройства с дифференциальным входом и парафазным выходом или ОУ с однофазным выходом. Такая ячейка содержит 2 дифференциальных усилителя с парафазным выходом, усилитель с однофазным выходом, по 2 матрицы резисторов и конденсаторов, несоединённые аналоговые ключи, логические вентиля, n- и p-МОП транзисторы. Количество элементов в каждой ячейке зависит от конкретных требований. Матрица конденсаторов содержит приблизительно 200 элементов с разными номиналами. Ячейка, показанная на рисунке 6, является оптимальной для реализа-

ции широкополосной обработки сигналов, в том числе фильтров на переключаемых конденсаторах, активных RC-фильтров, усилителей с цифровым управлением, АЦП и ЦАП, дельта-сигма модуляторов.

Выводы

Микроэлектронные интерфейсы для широкой номенклатуры датчиков физических величин целесообразно выполнять в виде систем в корпусе, объединяющих несколько полупроводниковых кристаллов, например, аналоговой части, выполненной по биполярно-полевой технологии, и цифровых блоков КМОП.

В условиях мелкосерийного производства проектирование аналоговой части экономически оправдано с использованием БМК и БСК. Универсальность БМК обуславливает их широкое распространение для производства аналоговых ИС, однако по ряду причин существующие БМК не в полной мере удовлетворяют разработчиков интерфейсов датчиков.

Главным преимуществом БСК является применение ранее апробированных и сертифицированных блоков, что уменьшает риск проектирования, снижает требования к квалификации разработчиков ИС, значительно упрощает и ускоряет создание радиационно-стойких микроэлектронных интерфейсов.

Наиболее подходящими для проектирования интерфейсов датчиков являются радиационно-стойкий БСК фирмы Sandia National Laboratories и VCA-4 фирмы Triad Semiconductor. Однако эти изделия спроектированы максимально универсальными, содержат большую цифровую часть и избыточное количество аналоговых блоков, что увеличивает конечную стоимость. Кроме того, БСК фирмы Sandia не содержит маломощных усилителей, крайне необходимых во многих интерфейсах. Маломощные усилители в кристалле VCA-4 работоспособны при напряжении питания, не превышающем 3,3 В, что ограничивает их применение.

Наилучшим сочетанием параметров обладает БСК типа VCA-12, созданный специально для обработки сигналов датчиков. Кристалл содержит небольшую цифровую часть и 12-вольтовые аналоговые блоки, число которых достаточно для реализации большин-

ства функций предварительной обработки сигналов. Основным недостатком VCA-12 является отсутствие малошумящих усилителей и радиационной стойкости.

Специалистами фирм Triad и Sandia начаты совместные работы по созданию радиационно-стойкого БСК для аэрокосмических и военных применений. При этом основное внимание уделяется модернизации аналоговых ячеек, макроячеек и функциональных блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников О. Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 1. Современная электроника. № 2. 2013. С. 44–49.
2. Дворников О. Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 2. Современная электроника. № 3. 2013. С. 58–63.
3. Дворников О. Интерфейсы датчиков для систем на кристалле. Современная электроника. № 8. 2013. С. 40–47.
4. Абрамов И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск. 2006.
5. Адамов Д. Эффективная разработка и производство мелкосерийных заказных СБИС. Современная электроника. № 4. 2011. С.10–12.
6. Прокопенко Н.Н. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем. Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011.
7. www.anadigm.com.
8. Стещенко В.Б. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. Нолидж, 2002.
9. Импортозамещающая технология ПЛИС – БМК. Часть 1: Разработка радиоэлектронной аппаратуры двойного применения. Компоненты и технологии. № 7. 2004. С. 80–86.
10. Пресс-служба РАСУ, Корп. АРМС-ТАСС. Задача создания отечественной элементной базы по-прежнему остаётся нерешённой. Chip News. № 4. 2004. С. 28.
11. Clein D. CMOS IC layout: concepts, methodologies, and tools. Newnes, 1999.
12. Structured ASIC. Gigoptix. www.gigoptix.com/products/39-structuredasic.
13. ON Semiconductor Delivers Structured ASIC Technology for Military and Aerospace SoCs and FPGA8to8ASIC Conversions. www.onsemi.com/PowerSolutions/newsItem.do?article=1734.
14. Structured ASIC Technology. www.faradaytech.com/html/products/structuredASIC.html.
15. Sandia Rad- Hard, Fast – Turn Structured ASIC. The ViArray. K.K. Ma, J. Teifel, R.S. Flores. https://nepp.nasa.gov/respace_mapld11/talks/tue/MAPLD/1500%20-%20KKMa.pdf.
16. ViArray. Trusted Rad - Hard Structured ASIC. www.sandia.gov/mstc/documents/factsheets/ViArray_Fact_%20Sheet_SAND2011-3935P.pdf.
17. Triad Semiconductor. Product Catalog. www.triadsemi.com/services/product-catalog.
18. Via Configurable ASICs for Analog and Mixed Signal Applications. Triad Semiconductor. www.triadsemi.com/2007/01/25/via-configurable-asics-for-analog-and-mixed-signal-applications.
19. SOI Analog/Mixed Signal ASICs for Radiation Hardened applications using Mixed Signal Via-Configurable Analog Arrays. Radiation Capability Responses to RFI #NNH09ZDA008L. Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop. July 15–17. 2009. P. 63–67.

