

# Выбор технологического процесса для производства специализированных радиационно-стойких СБИС типа «система в корпусе»

А.В. Бумагин<sup>1</sup>, Д.И. Воронков<sup>2</sup>, Т.Н. Древаль<sup>1</sup>, А.В. Руткевич<sup>2</sup>, О.Н. Шишкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Российские космические системы»

<sup>2</sup>ООО «НПП «Цифровые решения», [info@dsol.ru](mailto:info@dsol.ru)

*Аннотация* — в статье рассмотрены вопросы разработки базовых технологий производства специализированных электронных компонентов типа «СвК», используемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов. Обоснован выбор технологии производства и элементной базы кристаллов, стойких к дестабилизирующим факторам космического пространства.

*Ключевые слова* — система в корпусе, базовый технологический процесс, кремний на изоляторе, объемный кремний, корпусирование, многокристальный модуль, многоуровневая разводка, встроенный монтаж

## I. ВВЕДЕНИЕ

Требования сокращения сроков разработки СБИС, связанных с увеличением производительности проектирования, уменьшением риска ошибок и исключением итераций перепроектирования, приводят к необходимости разработки технологии проектирования СБИС типа «система в корпусе» (СвК). Эта технология основана на многократном повторном использовании на всех этапах проектирования ранее созданной интеллектуальной собственности в виде заранее разработанных, сертифицированных кристаллов или бескорпусных микросхем, таких как процессоры, оперативные и постоянные запоминающие устройства, цифровые и аналоговые узлы, интерфейсы и т.д.

Основные отличия СвК от технологии микромодулей заключаются в отсутствии в их составе дискретных компонентов, более высокой плотности компоновки при планарном размещении кристаллов, а также в использовании объемной компоновки кристаллов высокой степени интеграции.

Многократное использование готовых кристаллов является одним из ключевых факторов в сокращении разрыва между усложнением современной технологии полупроводникового производства и улучшением производительности проектировщиков за счет улучшения средств и методологий проектирования СБИС.

Целью настоящей статьи является исследование и разработка базовых технологий производства специализированных электронных компонентов типа «СвК», используемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов.

Одним из главных требований, предъявляемых к полупроводниковым изделиям для космической тех-

ники, является их радиационная стойкость, то есть устойчивость к воздействию космического излучения.

Основная задача, решаемая при разработке СБИС типа «СвК» заключается в обеспечении сбое- и отказоустойчивости в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства.

Уровень развития отечественной и зарубежной микроэлектроники позволяет реализовать кристаллы, входящие в состав специализированных СБИС, на основе технологий КМОП объемного кремния (ОК) или кремний-на-изоляторе (КНИ). Для удовлетворения требований к СБИС по критериям быстродействия при приемлемой площади, занимаемой кристаллом, достаточно использовать технологический процесс КМОП 0,6 мкм и менее. Опыт разработок показывает, что для запуска в производство цифровых СБИС средней емкости требуется, как правило, не менее двух итераций, каждая из которых сопровождается выпуском тестового кристалла (шаттла).

Рассмотрим особенности технологических процессов, используемых для производства СБИС типа «СвК», предназначенных для использования в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

При производстве кристаллов СБИС с высокими показателями сбое- и отказоустойчивости в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства целесообразно применение технологий КМОП КНИ и КМОП ОК.

Технология КМОП КНИ обладает следующими преимуществами по сравнению с технологией КМОП ОК:

- подавление тиристорного эффекта (стойкость к импульсным воздействиям);
- повышенная стойкость к одиночным сбоям;
- повышенное быстродействие;
- пониженное энергопотребление;
- более широкий температурный диапазон.

Основными недостатками технологии КМОП КНИ являются:

- необходимость обеспечения стойкости к накопленной дозе;
- сравнительно высокая стоимость изготовления по данной технологии в настоящее время.

## II. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СБИС ТИПА «СВК»

В табл. 1 представлены параметры технологических процессов по данным производителей, на основе которых возможно изготовление кристаллов объемом 100 тыс. эквивалентных логических вентилях, входящих в состав специализированных СБИС. Сроки изготовления кристаллов указаны только для опытных партий объемом 100 шт. и не включают квалификационные испытания.

Таблица 1

*Сравнительные характеристики существующих КМОП-технологий*

Производитель	Технология	Стойкость к дозе, крад.	Тиристорный эффект, МэВ
ОАО «Ангстрем»	БМК 5522 КМОП ОК 0,6	200	80
НИИСИ РАН	КМОП КНИ 0,5 КМОП КНИ 0,35	400 400	н/д <sup>(2)</sup>
ОАО «НИИМЭ и Микрон»	КМОП ОК 0,18 КМОП КНИ 0,24	100 <sup>(1)</sup> 300	н/д <sup>(2)</sup>
Зарубежные фабрики	КМОП ОК 0,09 – 0,5	<50 <sup>(2)</sup>	н/д <sup>(2)</sup>

Примечания:

1. Предварительная информация. Окончательные данные будут получены после проведения испытаний в I кв.2012 г.

2. В зависимости от технологического процесса.

Таким образом, технологическая поддержка изготовления кристаллов, входящих в состав СБИС типа «СвК» по технологии КМОП с проектными нормами 0,24...0,6 мкм и использовании в качестве подложек структур КНИ, являющихся наиболее перспективными с точки зрения радиационной стойкости, обеспечивается отечественными предприятиями.

Технология КНИ обеспечивает относительно высокое быстродействие при сравнительно низком значении потребляемой мощности и функционирование элементов на емкостную нагрузку и длинные линии связи, что является важным преимуществом при использовании кристаллов в составе «СвК».

Также возможно и использование зарубежных технологий, однако при этом необходима разработка радиационно-стойких библиотек элементов и проведение сертификационных испытаний, что влечет за собой дополнительные затраты.

Другим существенным недостатком рассмотренного варианта производства кристаллов СБИС является зависимость поставок микросхем от текущей политической ситуации и других внешних факторов.

Еще одним из вариантов построения кристаллов для использования в составе СБИС типа «СвК» является хорошо отработанная на сегодняшний день технология БМК. Ее недостатки заключаются в зависимости сроков производства от экономической ситуации на предприятии-изготовителе и от возможности поддержки производства в будущем. Кроме того, сравнительно малая логическая емкость подавляющего большинства отечественных БМК препятствует модернизации СБИС и увеличивает степень оптимизации и сроки разработки.

## III. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ «СВК»

К изготовлению систем в корпусе применимы различные методы и технологии производства многокристалльных модулей.

### A. Объемно-интегрированная конструкция на основе проволочных выводов

Система в корпусе, собранная по технологии объемных многокристалльных модулей, называемой за рубежом PoP (Package-on-Package, "корпус-на-корпусе"), представлена на рис. 1. Для обеспечения надежности во многих PoP-модулях пространство между корпусами заливают компаундом (технология Underfill), что компенсирует жесткие механические воздействия окружающей среды.

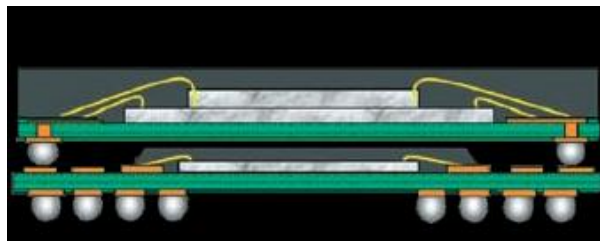


Рис. 1. Сборка по технологии PoP фирмы Amkor Technology [2]

При объемной интеграции с проволочными межсоединениями (рис. 2) используются различные способы размещения кристаллов друг над другом.

Так, в одном из способов кристаллы меньшего размера монтируются на большие кристаллы, образуя «пирамидальную» структуру. В другом способе при размещении кристаллов друг над другом между ними монтируются разделительные прокладки меньшей площади, чем кристаллы.

Достоинством метода PoP является портативность устройств, особенно для модулей памяти.

Недостатки:

- высокие требования к клею для ответственных применений;
- необходимость дорогостоящего технологического оборудования.

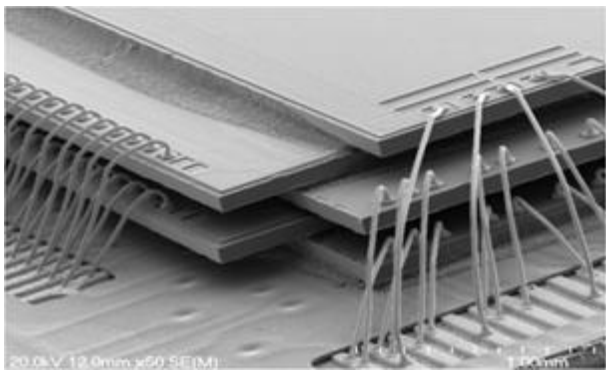


Рис. 2. Пример разварки выводов в системе в корпусе [3]

#### Б. Многокристальные сборки на печатных платах (МПП)

Наиболее технологичным является вариант МПП с металлизацией сквозных отверстий. Он позволяет получать до 20 слоев МПП, характеризуется высокой плотностью, хорошим качеством межслойных соединений, относительной простотой и экономичностью.

В рассматриваемом методе для наружных слоев используется односторонний, для внутренних - одно- или двусторонний фольгированный диэлектрик, и в качестве межслойной изоляции – стеклоткань. Из этих материалов изготавливаются заготовки, в которых организуются базовые отверстия для совмещения слоев, и производится очистка поверхностей. На заготовках внутренних слоев получают печатный рисунок с двух сторон посредством негативного фотохимического метода, выполняя при необходимости контактные переходы посредством химико-гальванической металлизации. Печатный рисунок наружных слоев получают комбинированным позитивным фотохимическим методом. Изготовленные слои совмещают друг с другом по базовым отверстиям с прокладыванием межслойной изоляции и спрессовывают в монолитную структуру.

Достоинствами метода МПП являются:

- простота технологии;
- возможность встраивания теплоотвода;
- относительно невысокие требования к точности размеров устанавливаемых компонентов;
- возможность размещения помимо кристаллов большого количества активных и пассивных компонентов.

Недостатки метода МПП:

- большой шаг проводников (0,2 мм);
- сложность изготовления переходных отверстий.

#### В. Конструкция на основе многоуровневой разводки по технологии интегральных микросхем (ИМС)

Уменьшение топологических размеров кристаллов СБИС сопровождается поиском новых конструктивных и технологических решений при создании систем многоуровневой разводки. Общая длина межсоединений в современной СБИС приближается к 10 км на кристалл, при этом для обеспечения коммутации всех элементов необходимо создание до 10 уровней металлизационной системы. Ограничения при дальнейшем увеличении степени интеграции обусловлены значительным увеличением времени задержки распростра-

нения сигнала и выделяемой мощности. Для обеспечения перехода на меньшие проектные нормы разрабатываются новые технологии формирования систем металлизации с использованием медных проводников и изолирующих диэлектрических слоев с низкой ( $k < 3,8$ ), а впоследствии и с ультранизкой ( $k < 2,2$ ) диэлектрической проницаемостью, например, на основе метода химического осаждения.

Полученные структуры объединяются в корпусе или на пластине.

Кристалл СБИС монтируется на основании корпуса методом эвтектической пайки или теплопроводящего клея. На втором ярусе отстоящего на 0,5 мм от поверхности кристалла СБИС располагается коммутационная плата, закрепляемая по периметру корпуса и имеющая две прорези, обеспечивающие доступ к контактным площадкам СБИС, предназначенным для электрического соединения. Соединения между контактными площадками кристалла, коммутационной платой и контактами корпуса осуществляются микропроволокой методом «шарик-клин». Подбором свойств материалов обеспечивается: тепловая изоляция СБИС и капсулированных датчиков; минимальные значения паразитных емкостей, приведенных ко входу СБИС; малые значения токов утечки (ионных загрязнений).

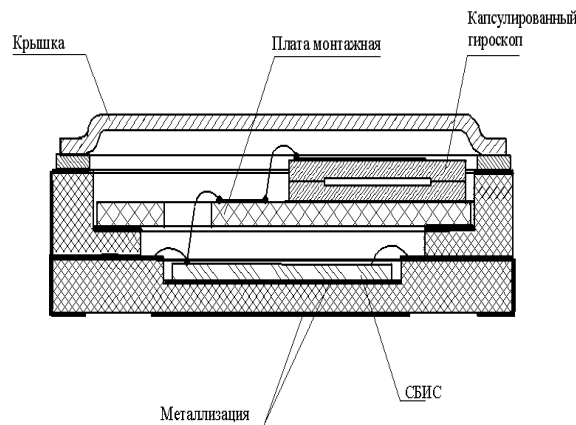


Рис. 3. Система в корпусе на основе многоуровневой разводки по технологии ИМС

Достоинством метода разводки по технологии ИМС является:

- возможность создания высокоинтегрированных систем

Недостатком метода разводки по технологии ИМС является:

- высокие требования к технологическим процессам.

#### Г. Технология встроенного монтажа

Встроенный монтаж может быть выполнен на печатной плате, керамической и металлической подложке с отверстиями в размер монтируемых кристаллов. Устанавливаемые в отверстия кристаллы соединяются диэлектриком и металлизацией.

Достоинствами метода встроенного монтажа являются:

- уменьшение габаритов электронных блоков;

- увеличение быстродействия электронной аппаратуры;
- автоматизация сборочно-монтажных процессов. Недостатками указанного метода являются:
  - относительно низкая надежность монтажа кристалла к подложке вследствие различных свойств линейного расширения;
  - деградация проводников подложки в процессе эксплуатации, вызванная наличием невымываемых вкраплений травителя, оставшихся в микропорах слоя проводников шириной менее 200 мкм;
  - относительно низкий коэффициент выхода годных;
  - высокая стоимость сборки.

#### Д. Планарные многокристалльные модули

Планарные многокристалльные модули (ПМКМ), существенно повышают плотность компоновки электронной аппаратуры.

Соединения элементов ПМКМ производятся методом тонкопленочной технологии по единой поверхности подложки и внедренных в нее кристаллов.

В качестве материала подложки может быть применена пластмасса, керамика или металл, в котором выполняются углубления по размерам кристаллов. После размещения кристалла на ее поверхности формируется слой диэлектрической пленки, обычно из полиимида, обеспечивающей планарность подложки и используемой в качестве межслойного диэлектрика. Эта конструкция обеспечивает максимальную плотность упаковки компонентов и быстродействие, уменьшает толщину модуля и исключает операции пайки или сварки из технологического процесса.

ПМКМ предназначены для применения в особо компактной электронной аппаратуре, используемой на борту КА, например, в аппаратах системы «ГЛОНАСС», портативных RFID-терминалах, имплантируемых медицинских приборах и т.п.

#### IV. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СБИС ТИПА «СВК»

Наиболее технологически доступной конструкцией является система в корпусе, выполненная на подложке из керамики с полупроводниковыми кристаллами, соединенными с использованием метода проволочного монтажа.

Наиболее соответствующими требованиям к СБИС, применяемым в бортовой аппаратуре космических аппаратов, а также по геометрическим параметрам, являются отечественные металлокерамические планарные корпуса типа LLCC, выпускаемые рядом отечественных предприятий: ОАО «ЗПП» (г. Йошкар-Ола), ООО «НПП «ТЭЗ» (г. Томилино) ЗАО «Тестприбор» (г. Москва).

В качестве одного из вариантов предлагается доработка указанных корпусов в части увеличения высоты и стойкости к пониженному атмосферному давлению посредством замены гибкой крышки.

Таким образом, на основании проведенных исследований, сборку изделий типа «СвК» для применения в

бортовой аппаратуре КА предполагается выполнять по следующей технологии:

- посадку кристаллов и платы в корпус осуществить на токопроводящий клей;
- соединения произвести с помощью проволоки диаметром 20...30 мкм по отработанной технологии;
- герметизацию произвести, предположительно, лазерным методом;
- контроль макротечей произвести по имеющейся технологии, если конструкция не будет противоречить результатам расчета прочности, экспериментального подтверждения результатов или методом окунания после обработки;
- контроль микротечей – по имеющейся технологии масс-спектрометрическим методом;
- маркировку – по имеющейся технологии методом переноса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье был проведен анализ и обоснование выбора типовых специализированных электронных компонентов и базовых технологических процессов изготовления кристаллов для использования в составе СБИС типа «СвК», предназначенных для использования в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

СБИС необходимо комплектовать специализированными электронными компонентами, стойкими к дестабилизирующим факторам космического пространства. Наиболее приемлемым решением является применение элементной базы с отечественными технологиями КМОП 0,6...0,24 мкм и использовании в качестве подложек структур «кремний на изоляторе», являющихся наиболее перспективными с точки зрения радиационной стойкости. Последние обеспечивают достаточно высокое быстродействие при сравнительно низком энергопотреблении и могут работать на емкостную нагрузку и длинные линии связи.

Предложена технология сборки СвК. В качестве конструктивного решения изделия «СвК» предложен вариант реализации с размещением кристаллов на подложке из керамики, соединенных с коммутационной платой методом проволочного монтажа и установленной в отечественном металлокерамическом корпусе с планарными выводами (типа LLCC) с доработкой в части увеличения высоты и стойкости к пониженному атмосферному давлению посредством замены гибкой крышки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства / А.В. Бумагин, Ю.Ю. Гулин, С.Д. Заводсков и др. О.Н. Шишкин // Электроника НТБ. 2010. №1.
- [2] Package on Package (PoP | PSfvBGA | PSfcCSP | TMV® PoP) [Amkor Technology] <http://www.amkor.com/go/packaging/all-packages>. (дата обращения: 26.12.2011).
- [3] 3D & Stacked-Die Packaging Technology Solutions [Amkor Technology] <http://www.amkor.com/go/packaging/all-packages>. (дата обращения: 26.12.2011).