

Конструкции и технологии изготовления современных микрокоммутационных модулей и тенденции их развития

Н. И. Каргин, А. В. Волосов, С. В. Миннебаев, П. И. Блинов

Современные технологии микрокоммутационных модулей (МКМ) позволяют увеличивать функциональность, производительность и надёжность радиоэлектронных устройств за счёт оптимизации конструкции электрических соединений между различными подсистемами. В данной работе рассмотрены варианты конструкции и технологий МКМ с позиции совместимости СВЧ монолитных интегральных схем на основе полупроводниковых материалов АЗВ5, с кремниевыми цифровыми схемами.

Ключевые слова: микрокоммутационный модуль, монолитная интегральная схема, вертикальная интеграция

Design and technologies of modern micro-chip modules fabrication and trends for their development

N. I. Kargin, A. V. Volosov, S. V. Minnebaev, P. I. Blinov

Modern technologies of micro-chip modules (MCM) fabrication allow increasing of functionality, performance and reliability of electronic devices through the design optimization of electrical connections between the various subsystems. This paper presents the observation of some variations of designs and technologies of MCM due to their ability to combine microwave monolithic integrated circuits (MMICs) based on semiconductor materials АЗВ5 and silicon-based digital circuits.

Keywords: micro-chip module, monolithic integrated circuit, vertical integration

Введение

Использование монтажа монолитных интегральных схем сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ МИС), цифровых и аналоговых интегральных схем (ИС) в конструкции типа микрокоммутационный модуль (МКМ) позволяют увеличивать функциональность, производительность и надёжность радиоэлектронных устройств. Так, в одном корпусе можно объединить усилители мощности и малошумящие усилители, изготовленные на полупроводниковых материалах АЗВ5, с кремниевыми цифровыми схемами. Более того, снижение массогабаритных характеристик уменьшает энергопотребление, что отражается на более широком спектре применений в портативных приложениях (мобильные телефоны, чип карты, беспроводная передача информации).

Однако при выборе конструкции и технологии МКМ, применяемых в СВЧ радиоэлектронике, необходимо учитывать некоторые особенности. К примеру, многие МИС, содержащие выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) структуры на полупроводниковых соединениях АЗВ5, очень чувствительны к температуре монтажа. Слишком высокая температура или большая про-

должительность процесса могут вызвать взаимную диффузию тонких МЛЭ-слоёв и ухудшение параметров и надёжности МИС. Поэтому температура процессов вертикальной интеграции СВЧ МИС должна быть низкой.

На сегодняшний день большинство крупных компаний и научно-исследовательских центров во всём мире работают над развитием технологий трёхмерной системной интеграции. На рис. 1 показана дорожная карта развития технологий микрокоммутационных модулей, предложенная сотрудниками Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (Институт надёжности и микро-интеграции им. Фраунгофера) в 2013 году [1].

Большой спектр технологических концепций можно разделить на три типа:
а) МКМ L-типа (laminated Multi-chip modules) – изготовленные по технологии печатных плат;

б) МКМ C-типа (ceramic Multi-chip modules) – в качестве основания используются керамические материалы;

в) МКМ D-типа (deposited Multi-chip modules) – кристаллы ИС монтируются на полупроводниковое основание, с использованием планарной технологии и технологии тонких плёнок.

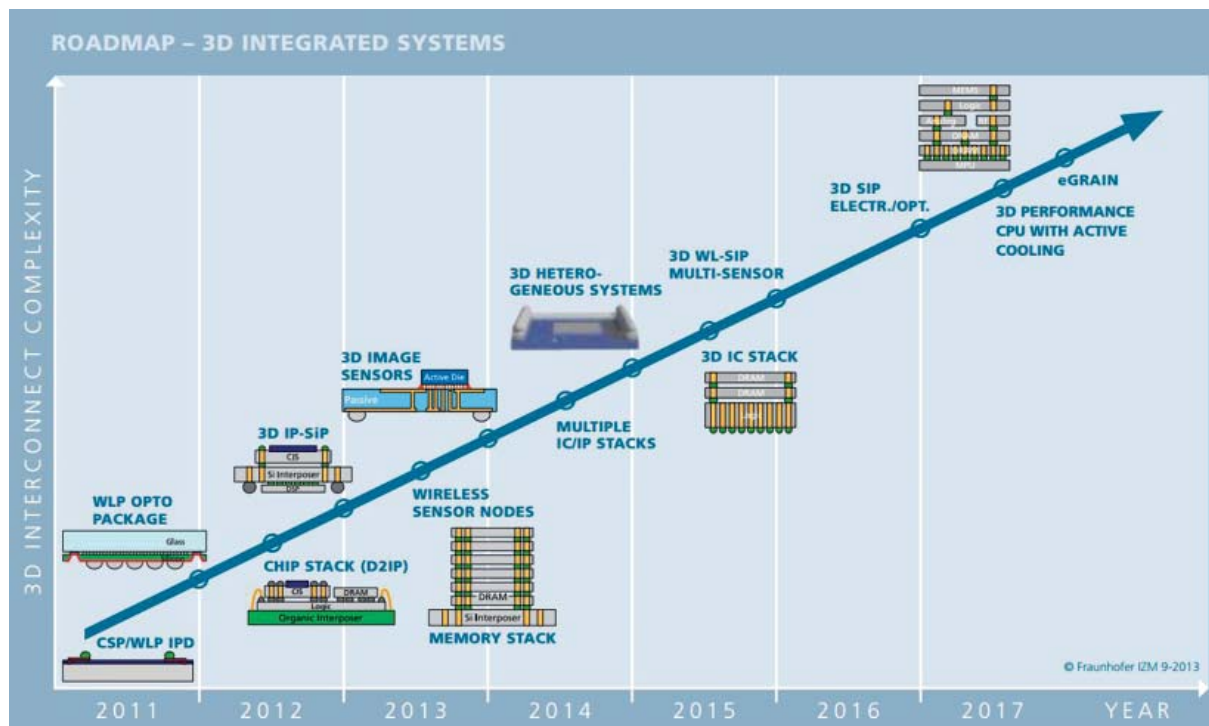


Рис. 1

Дорожная карта развития МКМ по данным Fraunhofer IZM в 2013 г.

В таблице приведены ориентировочные проектные нормы для МКМ различного типа, согласно которым наиболее приемлемым вариантом конструктивного решения для устройств, работающих на высоких частотах, можно считать вариант МКМ D-типа [2]. В качестве подложки-носителя в данном типе модулей чаще всего используется кремниевая подложка, что позволяет заметно улучшить его

тепловые характеристики за счёт более высокой теплопроводности кремния ($K_{\text{TSi}} = 149 \text{ Вт/(м·К)}$) по сравнению с материалами носителей в других типах МКМ. Также следует отметить, что для создания межслоевой изоляции могут использоваться не только диэлектрики на основе кремния (SiO_2 или Si_3N_4), но и более сложные химические соединения, такие как полиимиды (PI 2600, PI 2544 и т.д.)

Таблица

Ориентировочные проектные нормы для МКМ

№ п/п	Проектные нормы	МКМ-L	МКМ-C	МКМ-D
1.	Ширина линии (линия/промежуток), мкм	125/125	100/125	20/20
2.	Размер отверстий, мкм	250	200	20
3.	Воспроизводимость критических размеров, мкм	±12	±25	±5
4.	Количество слоёв	10	20	5
5.	Диэлектрическая проницаемость	3.5 ...4.5	5.2 ...7.8	2.9 ...3.9
6.	Толщина диэлектрика, мкм	112	100	1 ...10
7.	Включения/поры в основании и диэлектрике	есть	есть	нет
8.	Интегральные резисторы, конденсаторы	нет	есть	есть

или бензоциклобутен (BCB), обладающие более низкими значениями диэлектрической проницаемости (до 2.9). Следовательно, в МКМ D-типа могут быть достигнуты наилучшие показатели по степени интеграции и миниатюризации. В классическом понимании такой вариант МКМ должен состоять из кристаллов ИС, смонтированных на носителе – кремниевой пластине, на котором сформирована многоуровневая система коммутации (межсоединений), включающая в себя тонкоплёночные пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д.). В том случае, если реализовать пассивные элементы по тонкоплёночной технологии не удаётся, используют пассивные элементы в дискретном виде, которые монтируются вместе с кристаллами ИС на поверхность носителя.

В рамках технологии МКМ D-типа можно рассмотреть несколько вариантов построения модуля. Все они, так или иначе, используют «Through-silicon via Interposer» («TSV Interposer») – соединение сквозь кремниевый чип (ССКЧ) [3]. В настоящее время существуют технологии позволяющие формировать неизолированные, изолированные, а также коаксиальные металлизированные отверстия в кремниевой пластине.

Ниже будут рассмотрены наиболее перспективные конструкции модулей и предложены варианты их реализации.

Конструкция МКМ модуля из двух носителей, использующих ССКЧ, соединённых «обратными» сторонами

Модуль состоит из двух подложек с ССКЧ, на каждой из которых смонтированы кристаллы различного функционального назначения, например МЭМС (микро электро-механическая структура), СВЧ МИС или цифровая ИС. На поверхности каждой из них сформирована межэлементная коммутация со встроенными пассивными элементами, сформированными по тонкоплёночной технологии. Рассматриваемые подложки соединены «обратными» сторонами (сторона пластины, на которую не производится монтаж составных частей МКМ). Схематичное изображение конструкции МКМ такого вида представлено на рис. 2.

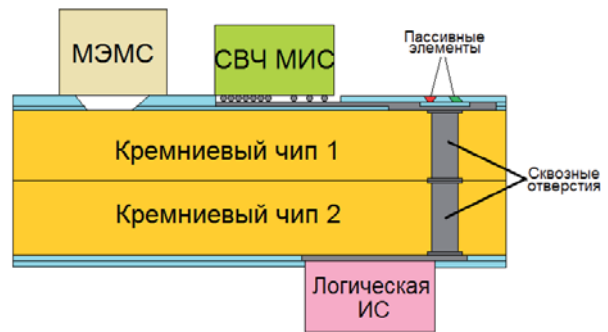


Рис. 2

Схематичное изображение конструкции комбинированного МКМ, основанной на соединении двух функциональных фрагментов [4]

Представленный на рис. 2 вариант конструкции МКМ обладает следующими преимуществами:

- простота технологии сборки;
- доступность смены типономиналов элементной базы и ремонтпригодность.

К недостаткам же такого вида конструкций следует отнести:

- сложность организации отвода тепла из-за отсутствия протяжённых плоских поверхностей;
- введение в конструкцию дополнительных элементов (например, антенны) не поддаётся автоматизации и требует прецизионной ручной сборки.

Конструкция МКМ двух носителей, использующих ССКЧ, с формированием размерного «заглубления» для монтажа кристаллов

Одним из возможных вариантов, используемых для достижения лучшего теплоотвода, является применение известной технологии планаризации поверхности МКМ. В структурах такого вида производится монтаж кристаллов в «заглубления», сформированные в структуре кремниевого чипа со сквозными отверстиями, после чего плоскостность поверхности достигается за счёт применения органического полимера [5]. В этом случае мы получаем две плоские поверхности, одну из которых можно использовать для присоединения теплоотвода, другую – для присоединения антенны (рис. 3). В качестве экрана между разнофункциональными фрагментами модуля в этом варианте можно также использовать слой низкоомного кремния, формируемый известными технологическими методами в глубине ССКЧ-основания.

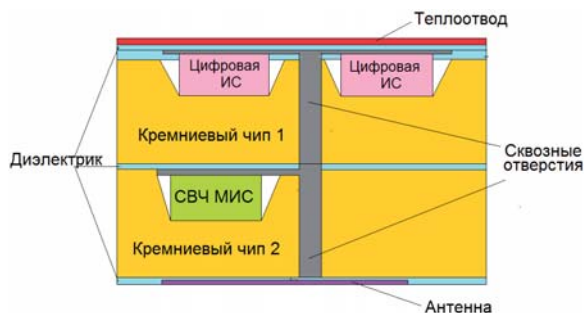


Рис. 3

Схематическое изображение конструкции МКМ с антенной, построенной на двух ССКЧ-основаниях с применением «заглубления» кристаллов и плоской системой межэлементных соединений, включающей пассивные элементы [5]

При изготовлении МКМ данного вида возможен вариант с размещением цифровых и СВЧ кристаллов на одной стороне ССКЧ-основания. Но следует заметить, что это может ухудшить экранирование разнофункциональных фрагментов (из-за повышения поверхностной плотности монтажа) и усложнить структуру согласования антенны с выходными элементами СВЧ МИС модуля, так как точность изготовления коаксиальных соединений, проходящих сквозь два ССКЧ-основания, может быть недостаточной. В то же время при соединении сквозь одно основание можно ожидать, что удовлетворительное согласование может быть достигнуто даже с применением не коаксиального соединения (толщина ССКЧ-основания как правило составляет 100-150 мкм).

К недостаткам данного вида конструкции следует отнести вероятность повреждения уже собранной стороны основания в процессе монтажа ССКЧ-оснований или монтажа кристаллов на обратную сторону основания, в случае применения «заглублений» с обеих его сторон. Разумеется, методы защиты, тем более плоской поверхности, существуют, но возможность такого вида брака необходимо учитывать [6].

Конструкция высокоплотного электронного модуля (ВПЭМ) на одном ССКЧ-основании с использованием размерного «заглубления» и объёмного формирования цифровых схем

С целью уменьшения объёма сборочных операций и снижения вероятно-

сти повреждения собранной стороны при сборке второй предлагается конструкция, в которой весь цифровой фрагмент МКМ формируется в объёме ССКЧ-основания на этапе его изготовления (рис. 4). Для исключения «узкого» функционального назначения фрагмента предлагается выполнить его в виде программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), снабжённой соответствующей инфраструктурой. В этом случае схемотехническое решение фрагмента обработки и управления могут задаваться программным способом после окончательной сборки МКМ.

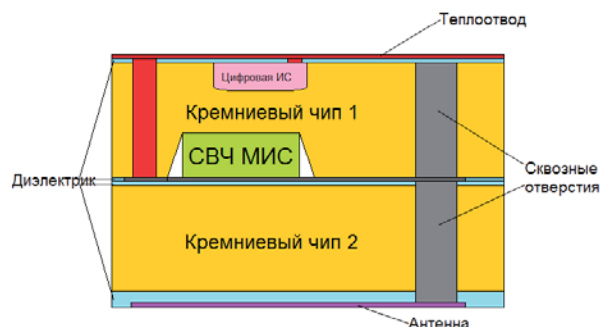


Рис. 4

Схематическое изображение конструкции МКМ с антенной, построенной на двух ССКЧ-основаниях с применением фрагмента обработки и управления сигналами, реализованного в монолитном исполнении [7]

Заключение

В работе рассмотрены основные конструктивные и технологические решения для МКМ, которые в настоящее время считаются наиболее перспективными. Однако необходим более детальный анализ в вопросах создания вертикальных межсоединений: сквозное травление основания и последующая металлизация. Для устройств, работающих на высоких частотах, важно упростить процесс согласования, поэтому предлагается сквозные отверстия изготавливать по типу коаксиальных отверстий.

Технология монтажа и разводки кристаллов монолитных интегральных схем в углубление в ССКЧ-основании предполагает высокую точность позиционирования соответствующего оборудования, поэтому реализуемость этой технологии необходимо подтверждать экспериментально.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства «Разработка перспективных СВЧ компонентов для высокоплотных радиоэлектронных модулей нового поколения» шифр «2013-218-04-050»; постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Литература

1. Fraunhofer IZM – ASSID All Silicon System Integration Dresden, Berlin 2013, Germany. URL: [http://www.izm.fraunhofer.de/content/dam/izm/de/documents/Abteilungen/ASSID_All_Silicon_System_Integration_Dresden/ASSID_flyer_online_\(2a\).pdf](http://www.izm.fraunhofer.de/content/dam/izm/de/documents/Abteilungen/ASSID_All_Silicon_System_Integration_Dresden/ASSID_flyer_online_(2a).pdf) (дата обращения: 01.12.2014).

2. Norman A. Blum, Harry K. Charles, A. Shaun Francomacaro Multichip Module Substrates. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1999, vol. 20, no. 1, pp. 62-69.

3. Новиков А. Тенденции развития технологий монтажа, соединений и корпусирования // Международный симпозиум АСОЛД-2009 «Построение эффективных производств в условиях кризиса», Москва, Россия.

4. Eric O., Beyny D. A. Outline System Technology Convergence. Progress and Challenges. System Integration Program // IMEC 2011, Drezden.

5. Laskar A., Sutono D., Staiculescu C.-H., Lee M. F., Davis K., Lim and M. Tentzeri Multi-Layer 3D System-on-Package (SOP) Architectures for Highly Integrated Microwave and Millimeter Wave Radio Front-End // Packaging Research Center School of ECE Georgia Institute of Technology Yamacraw Design Center Atlanta, GA 30332, USA.

6. Wey Y.-G., Giboney K., Bowers J., et al. 110-GHz GaInAs/InP double heterostructure p-i-n photodetectors // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 1995, vol. 13, no. 7, pp. 1490-1499.

7. Li-Rong Zheng IL 2208 Electronic System Packaging (2B5457 Mixed Signal System Design)

// Lecture 10: RF Microwave System Packaging. Laboratory of Electronics and Computer System Royal. Institute of Technology (KTH) SE-164 40 Kista, Sweden.

References

1. Fraunhofer IZM – ASSID All Silicon System Integration Dresden, Berlin 2013, Germany. URL: [http://www.izm.fraunhofer.de/content/dam/izm/de/documents/Abteilungen/ASSID_All_Silicon_System_Integration_Dresden/ASSID_flyer_online_\(2a\).pdf](http://www.izm.fraunhofer.de/content/dam/izm/de/documents/Abteilungen/ASSID_All_Silicon_System_Integration_Dresden/ASSID_flyer_online_(2a).pdf) (accessed 1 December 2014).

2. Norman A. Blum, Harry K. Charles, A. Shaun Francomacaro Multichip Module Substrates. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1999, vol. 20, no. 1, pp. 62-69.

3. Novikov A. Progress trend of technologies of assembly, bonding and chip array packages. *Mezhdunarodnyi simpozium ASOLD-2009 «Postroenie effektivnykh proizvodstv v usloviyakh krizisa»* (International Symposium ASOLD-2009 «Construction of efficient production in a crisis»). Moscow, Russia.

4. Eric O., Beyny D. A. Outline System Technology Convergence. Progress and Challenges. System Integration Program // IMEC 2011, Drezden.

5. Laskar A., Sutono D., Staiculescu C.-H., Lee M. F., Davis K., Lim and M. Tentzeri Multi-Layer 3D System-on-Package (SOP) Architectures for Highly Integrated Microwave and Millimeter Wave Radio Front-End // Packaging Research Center School of ECE Georgia Institute of Technology Yamacraw Design Center Atlanta, GA 30332, USA.

6. Wey Y.-G., Giboney K., Bowers J., et al. 110-GHz GaInAs/InP double heterostructure p-i-n photodetectors // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 1995, vol. 13, no. 7, pp. 1490-1499.

7. Li-Rong Zheng IL 2208 Electronic System Packaging (2B5457 Mixed Signal System Design) // Lecture 10: RF Microwave System Packaging. Laboratory of Electronics and Computer System Royal. Institute of Technology (KTH) SE-164 40 Kista, Sweden.