

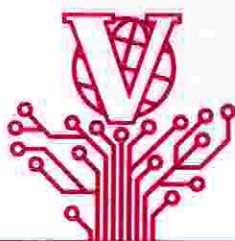


НАНО

ИНДУСТРИЯ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА-2019

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
«Микроэлектроника-2019»

Часть II

5-я Международная научная конференция
«Электронная компонентная база
и микроэлектронные модули»
Сборник докладов

Республика Крым,
г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г.



ТЕХНОСФЕРА



Концерн ВКО
Алмаз - Антей

Концерн создан в 2002 году, когда по указу президента Российской Федерации и постановлению правительства Российской Федерации в АО «Концерн ПВО «Алмаз – Антей» были объединены 46 предприятий: заводов, научно-производственных объединений, конструкторских бюро и научно-исследовательских институтов, которые занимались разработкой и производством зенитных ракетных комплексов малой, средней и «большой дальности действия, основных типов средств радиолокационной разведки и автоматизированных систем управления. Затем в 2007 году произошло укрупнение концерна, и на сегодня в его составе более шестидесяти предприятий из семнадцати регионов страны.

Концерн стал первым крупным холдингом, созданным в рамках Федеральной целевой программы «Реформирование и развитие оборонно-промышленного комплекса (2002–2006 годы)». На его долю выпала функция первопроходца в решении проблем формирования акционерного капитала и корпоративной системы управления.



При осуществлении самостоятельной внешнеторговой деятельности концерн обладает правом на производство следующих видов работ и оказание услуг при эксплуатации ранее поставленной продукции военного назначения:

- поставка запасных частей, агрегатов, узлов, приборов, комплектующих изделий, специального, учебного и вспомогательного имущества, технической документации к ранее поставленной продукции военного назначения;
- проведение работ по освидетельствованию, эталонированию, продлению срока эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту (в том числе с модернизацией, предполагающей проведение НИОКР), утилизации и других работ, обеспечивающих комплексное сервисное обслуживание ранее поставленной продукции военного назначения;
- обучение иностранных специалистов проведению указанных выше работ;
- участие в создании совместных с иностранными заказчиками предприятий (организаций), занимающихся техническим обслуживанием, ремонтом и уничтожением (утилизацией) продукции военного назначения, создание и дооборудование на территории иностранных государств объектов, обеспечивающих комплексное сервисное обслуживание поставленной продукции военного назначения.

www.almaz-antey.ru

Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей»

Российская Федерация, 121471, г. Москва, ул. Варейская, д. 41
тел.: +7 (495) 276 29 60, факс: +7 (495) 276 29 81
e-mail: antey@almaz-antey.ru

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Microsystems. Sensors and Actuators 374	Микросистемы. Сенсоры и актюаторы
Digital processing and analysis of electroseismocardiograms 374	Цифровая обработка и анализ электросейсмокардиосигналов
V. M. Achilidiev Yu. N. Evseeva N. A. Bedro V. A. Soldatenkov Yu. K. Gruzевич M. N. Komarova A. D. Levkovich V. M. Uspensky	В. М. Ачильдиев Ю. Н. Евсеева Н. А. Бедро В. А. Солдатенков Ю. К. Грузевич М. Н. Комарова А. Д. Левкович В. М. Успенский
Gyrocardiography as a method of noninvasive diagnosis of diseases 381	Гироскопическая кардиография как способ неинвазивной диагностики заболеваний
V. M. Achilidiev N. A. Bedro Yu. K. Gruzевич Yu. N. Evseeva M. N. Komarova M. E. Rulev V. A. Soldatenkov V. M. Uspensky	В. М. Ачильдиев Н. А. Бедро Ю. К. Грузевич Ю. Н. Евсеева М. Н. Комарова М. Е. Рулев В. А. Солдатенков В. М. Успенский
Pressure sensor for surface acoustic waves with mirror topology 389	Датчик давления на поверхностных акустических волнах с зеркальной топологией
I. G. Ancev S. V. Bogoslovsky G. A. Sapozhnikov	И. Г. Анцев С. В. Богословский Г. А. Сапожников
LTCC packaged digital isolator 392	Цифровой изолятор в специализированном корпусе, выполненном по технологии LTCC
V. A. Butuzov A. E. Nazarenko N. Yu. Dmitriev A. V. Trofimov V. A. Kosevskoy Yu. I. Bocharov V. Yu. Prokopyev O. N. Kus	В. А. Бутузов А. Е. Назаренко Н. Ю. Дмитриев А. В. Трофимов В. А. Косевской Ю. И. Бочаров В. Ю. Прокопьев О. Н. Кусь
Features of Bare Integrated Circuits Assembling Processes in the Embedded Mounting Technology 396	Особенности процессов сборки бескорпусных микросхем в технологии изготовления микросборок на основе внутреннего монтажа
D. V. Vertyanov V. N. Sidorenko I. A. Belyakov	Д. В. Вертянов В. Н. Сидоренко И. А. Беляков
Planar Electrochemical Magnetohydrodynamic Accelerometer 407	Планарный электрохимический магнитогидродинамический акселерометр
P. V. Dudkin D. A. Zhevnenko E. S. Gornev T. V. Krishtop V. G. Krishtop	П. В. Дудкин Д. А. Жевненко Е. С. Горнев Т. В. Криштоп В. Г. Криштоп

Выпускается при содействии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования, в базу RSCI на платформе Web of Science и в Перечень ВАК (с 18.03.2016)

Редакционный совет:
И. БЕЛЯЕВ, Ю. БОРИСОВ, С. БУЛЯРСКИЙ, В. БЫКОВ, П. ВЕРНИК, В. КАНЕВСКИЙ, А. ЛАТЫШЕВ, В. ЛУКИЧЕВ, В. ЛУЧИНИН, П. МАЛЬЦЕВ, Ю. ДАРХОМЕНКО, А. РЕЗНЕВ, А. САУРОВ (гл. ред.), А. СИГОВ, В. ТЕЛЕЦ, П. ТОДUA, Ю. ЧАПЛЫГИН, И. ЯМИНСКИЙ

Главный редактор: А. САУРОВ
Зам. главного редактора: А. АЛЕШИН
Отв. секретарь: Э. ГАЗИНА journal@electronics.ru
Компьютерная верстка: ИП Р. АВТУШЕНКО
Дизайн: Н. СЕМЯЧКИНА

Отдел рекламы:
А. ЦАПЛИН ats71@mail.ru
О. ЛАВРЕНТЬЕВА nano@technosphere.ru
Сбыт: А. МЕТЛОВ sales@electronics.ru
Подписка: Е. ЗАЙКОВА magazine@technosphere.ru

Учредитель: АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Генеральный директор: О. КАЗАНЦЕВА
НАНОИНДУСТРИЯ ©
Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 7.09.2017 ПИ № ФС77-70992

Журнал выходит 8 раз в год с 2012 года
Тираж спецвыпуска: 150 экз. Цена договорная
Подписано в печать 15.06.2020, заказ № Т-96

© При перепечатке ссылка на журнал «НАНОИНДУСТРИЯ» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
Рукописи рецензируются, но не возвращаются.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета в типографии АО «Т 8 Издательские Технологии» 109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Адрес редакции:
ул. Краснопресненская, д. 16, стр. 2
Для писем: 125319, Москва, а/я 91
Тел.: +7 (495) 234-0110 доб. 183
Факс: +7 (495) 956-3346
E-mail: journal@electronics.ru
Internet <http://www.nanoindustry.ru>
<http://elibrary.ru>
www.e.lanbook.ru



DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.434.437

УДК 621.3.049.76

КОММУТАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРИПОЙНЫМИ ШАРИКАМИ В МИКРОСИСТЕМАХ 2,5D- И 3D-СБОРОК CRYSTALS INTERCONNECTION VIA SOLDER BALLS IN 2.5D AND 3D MICROSYSTEMS

ЗМЕЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8
svz@zitic.ru

ZMEEV SERGEY V.

Zelenograd Innovative Technology Center JSC
8 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia
svz@zitic.ru

Рассмотрены особенности технологического процесса пайки кристаллов через припойные шарики методом перевернутого кристалла (флип-чип), произведено сравнение методов монтажа флип-чип и проволоочной разварки, приведены примеры монтажа различных комбинаций материалов кристалла и подложки.

Ключевые слова: коммутация кристаллов; 3D-сборка; флип-чип; многокристальная 2,5D- и 3D-интеграция; многофункциональные микросистемы; UBM (Under Bump Metallization).

The paper considers features of technological process of soldering crystals through solder balls by the inverted crystal method (flip-chip), as well as compares methods for mounting a flip-chip and wire bonding and gives examples of mounting various combinations materials for crystal and substrates.

Keywords: crystal interconnection; 3D assembling; flip-chip; multicrystal 2.5D and 3D integration, multifunctional microsystems; UBM (Under Bump Metallization).

Совершенствование конструкций интегральных микросхем происходило для удовлетворения потребностей оборонной и аэрокосмической отраслей, причем первоочередное значение имели надежность и массогабаритные соотношения, а стоимость была второстепенным фактором. В настоящее время движущими силами развития передовых полупроводниковых технологий стали необходимость миниатюризации, обеспечение крупносерийного выпуска разнообразных электронных устройств массового потребления с высокими функциональными возможностями и низкой ценой. В связи с достигнутыми пределами разрешающих кремниевых структур распространение получают методы многокристальной 2,5D- и 3D-интеграции схем. Компании — производители самых современных потребительских изделий разрабатывают сложные технологии корпусирования и межсоединений, которые в большей степени основываются на применении коммутации не отдельных корпусированных микросхем, а кристаллов. Из распространенных и хорошо изученных методов коммутации кристаллов можно выделить разварку алюминиевой или золотой проволокой диаметрами от 18 до 70 мкм и метод

перевернутого кристалла (флип-чип) с коммутацией припойными шариками размером от 30 до 760 мкм.

При разработке изделий, требующих высокой скорости обработки сигнала, минимизации RC-задержки, повышения энергоэффективности микросистемы, имеют важное значение длина и форма соединений. Наиболее короткие соединения достигаются способом коммутации по флип-чип-методу, что предоставляет ряд преимуществ по сравнению с проволоочной разваркой.

За счет короткой коммутации в критических сигнальных линиях паразитная индуктивность контура сводится к минимуму, вследствие чего становятся ниже уровень излучения и объем импульсных помех, в том числе перекрестных, лучшие показатели частоты возбуждения паразитных осцилляций и меньше время их затухания (в особенности сильно влияние на высокочастотные линии).

При разработке изделия паразитные параметры компенсируются цепями коррекции путем ввода в схему дополнительных элементов: чем меньше число корректирующих элементов, тем лучше, соответственно, массогабаритные показатели, скорости прохождения сигнала, рассеиваемая мощность изделия.

Таблица 1. Расчет сопротивления проводников коммутации

№	Материал проводника	Удельное сопротивление (при 0 °С), 10 ⁻⁵ Ом·м [1]	Радиус проводника, мкм	Общая длина проводников при 1000 контактах, м	Сопротивление, Ом
Проволоочное соединение					
1	Золото	2,06	1·10 ⁻⁵	1	65,61
2	Медь	1,55	1·10 ⁻⁵	1	49,36
3	Алюминий	2,5	1·10 ⁻⁵	1	79,62
Соединение припойным шариком					
4	Олово	11,15	2,5·10 ⁻⁵	0,03	1,76

Длина соединений также напрямую влияет на сопротивление цепи. Для примера рассчитаем суммарное сопротивление 1000 соединений, полученных разваркой проволокой диаметром 20 мкм и длиной 1 мм каждое, из разных материалов и сравним с суммарным сопротивлением 1000 соединений, полученных припойными оловянными шариками диаметром 40 мкм, по формуле

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s},$$

где ρ — удельное сопротивления проводника, s — площадь поперечного сечения соединения, l — длина соединения. Расчетные данные приведены в таблице №1.

При термокомпрессионном монтаже в типовом процессе шарик приобретает цилиндрическую выпуклую форму, сокращая длину соединения до полутора раз относительно исходного диаметра шарика.

Исходя из полученных расчетов видно, что при относительно худших электрических параметрах припойного шарика из олова при большом количестве коммутируемых контактов общее сопротивление соединений получается значительно меньше, чем при проволоочной разварке из материалов с лучшими электрическими характеристиками.

При использовании флип-чип-метода коммутации кристалл монтируется лицевой стороной к лицевой стороне подложки и электрически соединяется с помощью термокомпрессионного монтажа. Если подложка имеет сквозную металлизацию, как на печатных платах или TSV (through silicon vias) на пластине [2], монтаж кристаллов можно осуществлять с обеих сторон. Такой способ монтажа позволяет распределить выводы по всей поверхности кристалла микросхемы, существенно экономя площадь конечного устройства по сравнению с разваркой проволокой, и значительно укорачивает межсоединения, позволяя уменьшить число пассивных компонентов цепей коррекции микросистемы, делая микросхему более компактной. При этом в определенных случаях флип-чип-сборка может обеспечить лучшие механические характеристики и лучший отвод тепла от микросхемы, поскольку радиатор можно размещать непосредственно на обратной стороне кристалла, а массивные бампы являются дополнительными мостиками теплоотвода.

Рассмотрим конструктивно-технологическое решение коммутации тестовой многокристальной сборки, состоящей из нескольких кремниевых кристаллов с резистивными цепочками, методом флип-чип с помощью припойных бессвинцовых шариков SAC305 (Sn / Ag 3.0 / Cu 0.5) размером 60 ± 3 мкм и составом 96,5% олова, 3,0% серебра и 0,5% меди. SAC305

рекомендуется для бессвинцовой пайки (вместо припоев Sn63/Pb37 и Sn60/Pb40), обеспечивая хорошее смачивание, прочность паяных соединений и повышенную механическую усталостную прочность.

В рамках требования базовой технологии все контактные площадки (КП) имеют позолоченную поверхность, что позволяет с легкостью, без дополнительной обработки поверхности, формировать припойные шариковые выводы на КП. Размер контактной площадки по квадратному окну вскрытия — 100×100 мкм алюминиевой металлизации, после формирования трехосставного позолоченного слоя (UBM) в 5 мкм размер подготовленной КП для бампирования составляет 106×106 мкм. Припойные шарики устанавливаются на КП путем расплавления лазером исходного шарика, далее в струе азота каплей наносятся на контакт, приобретая форму полусферического припойного контакта, как показано на рис. 1. Размер сферы зависит от формы контакта, соотношения размера шарика и контакта, а также режимов установки припойных шариков.

Формирование шариковых выводов на контактных площадках кристалла производится индивидуально на каждом контакте согласно предварительно подготовленной программе со скоростью до 10 шариков в секунду с точностью позиционирования до 5 мкм. Данный процесс в основном не требует изготовления специальной оснастки, применения флюса, не подвергает материал стрессу, не требует дополнительного проведения температурной обработки и очистки. Контроль установки шариков может осуществляться как автоматизированной оптической системой контроля самой установки, так и оператором через надстроенный оптический микроскоп установки. Процесс может проходить как на пластине размером до 300 мм, так и на отдельных кристаллах. Без дополнительной оснастки размер обрабатываемого кристалла — от 2 мм, при меньшем размере кристалла подготавливается оснастка. Базовый размер применяемых шариков — в диапазоне 40–760 мкм [3]. Производитель оборудования квалифицировал процесс работы на шариках размером 30 мкм [4] с возможностью уменьшения до 20 мкм. В качестве припойного материала шариков применяются следующие составы: SnAgCu, SnAg, SnPb, AuSn, InSn, SnBi, Cu-core.

В рамках базовой технологии контакты должны быть покрыты иммерсионным золотым слоем UBM (Under Bump Metallization). На алюминисые контакты применяют комбинацию цинк-никель-иммерсионное золото, на медные контакты — палладий-никель-иммерсионное золото. Цинк или палладий являются зародышевым адгезионным слоем к КП и основному (по толщине) слою никеля (4–20 мкм), который, в свою очередь, хорошо подвергается иммерсионному золочению (150–200 нм).

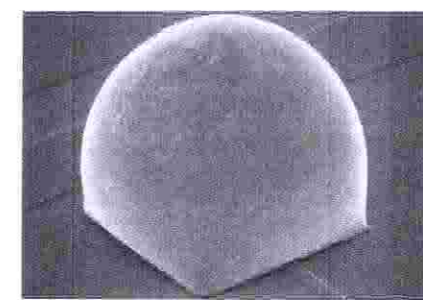
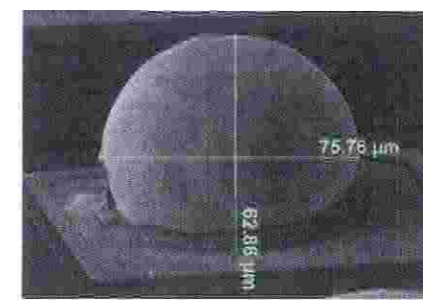
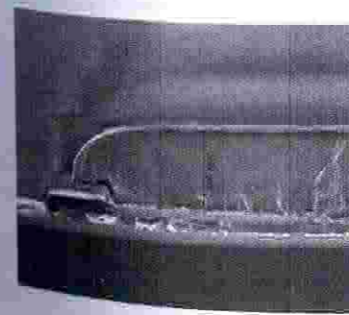


Рис. 1. Слой UBM в скеле (а), сформированный припойный шарик на алюминиевом контакте (б), припойный шарик на квадратном контакте с UBM (в)

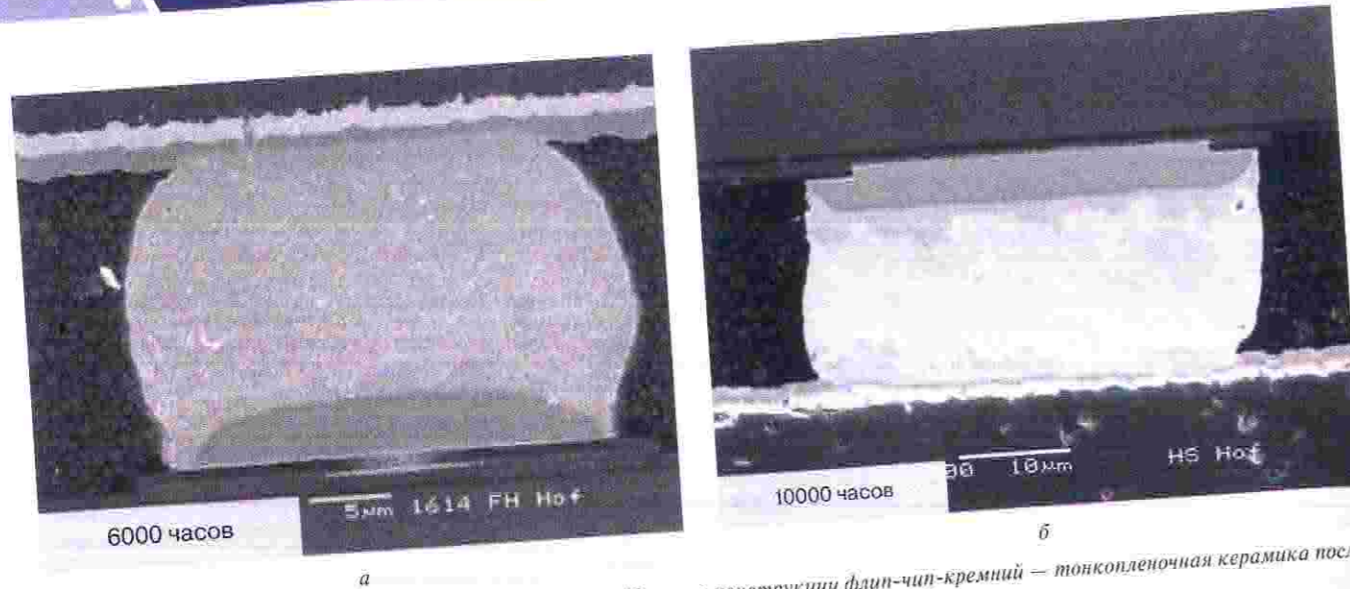


Рис. 2. Поперечное сечение припойных шариков диаметром 40 мкм, в конструкции флип-чип-кремний — тонкопленочная керамика после проведения испытаний на надежность +125 °С: 6000 часов (а), 10000 (б)

Все материалы осаждаются неэлектролитическим химическим способом, что позволяет обрабатывать пластины с уже сформированными структурами, не опасаясь повреждения схемы электростатическим разрядом. Рост UBM-слоя происходит на открытых участках металла и во всех направлениях, что необходимо учитывать при проектировании. Применение таких комбинаций обусловлено необходимостью остановки растворения золота в оловянной среде припойных шариков на подложке никеля, данные связи обладают хорошими надежностными характеристиками [5].

При последовательном нанесении шариков друг на друга можно формировать относительно высокие столбы, заполняя колодцы в подложке, например в кремнии, имитируя при этом TSV-соединение, но с небольшим аспектным соотношением, поскольку размер колодца должен превышать размер шарика на 25–30%. В виде эксперимента удалось вертикально собрать пять слоев кристаллов на кремниевой подложке, заполняя шариками последовательно каждый слой колодцев в кремнии и формируя ровный проводящий столб, как показано на рис. 3. Количество кристаллов, собираемых в стек, ограничено



Рис. 3. Коммутация в стек по пять кристаллов на кремниевой подложке: рентген-изображение сборки кристаллов 2×2 мм: а — вид сбоку; б — вид сбоку в оптический микроскоп; в — фото тестовой сборки 20×20 мм, с пятиуровневыми стеками кристаллов 10×10 мм, 2×2 мм и в один уровень флип-чип-кристалла 3×5 мм

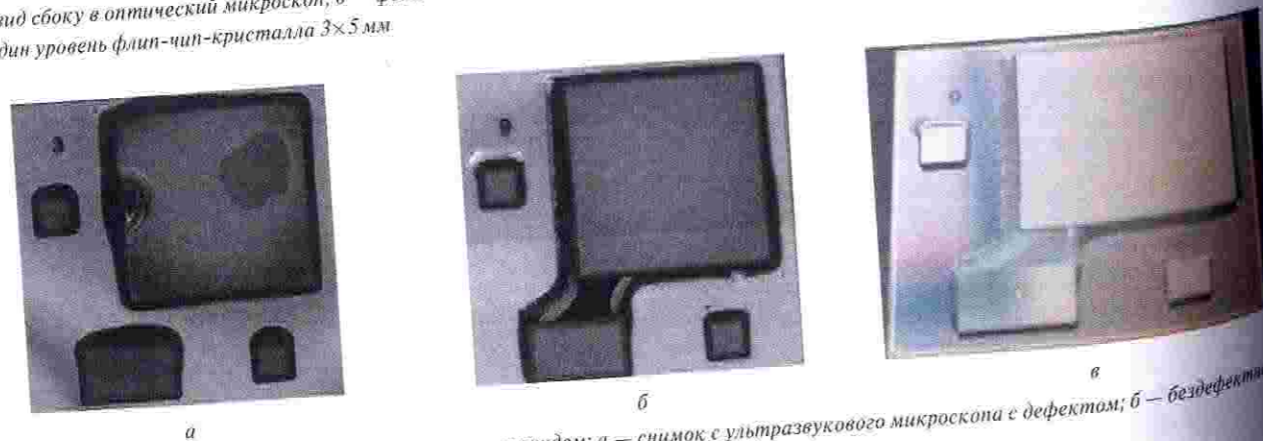


Рис. 4. Капсулированные кристаллы капиллярным компаундом: а — снимок с ультразвукового микроскопа с дефектом; б — бездефектная заливка кристалла; в — фото внешнего вида капсулированной сборки

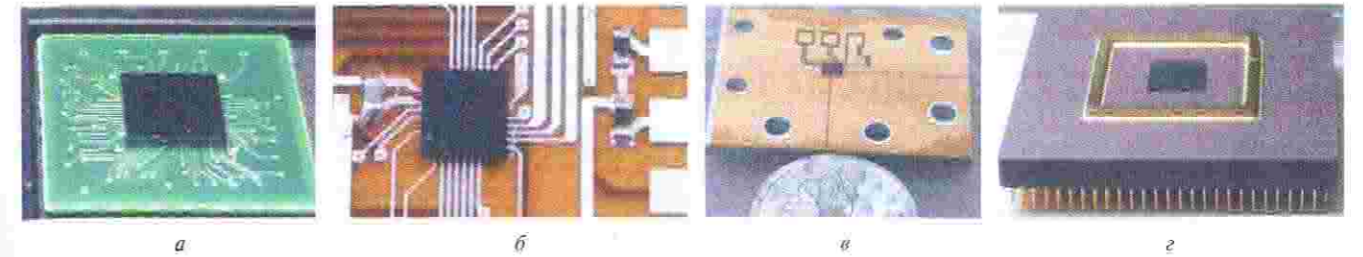


Рис. 5. Примеры сборки: а — кремний на стеклотекстолитовую плату; б — кремний на полиимидную плату; в — сапфир на алюмооксидную плату; г — кремний в металлокерамический корпус

возможностями оборудования по высоте собираемой конструкции, которая не должна превышать 10 мм.

Сформированные припойные контакты можно коммутировать с ответными контактами подложки микросистемы при помощи точного совмещения и проведения термокомпрессионного монтажа, режимы которого подбираются индивидуально в зависимости от конструкции сборки.

Формирование припойных контактов в процессе термокомпрессии проходит без применения флюсов и не требует после операции дополнительной отмывки. В зависимости от конструкции в базовой технологии применяется подкристалльная заливка высокотекучими компаундами. Капиллярный компаунд прочно соединяет микросистему и, капсулируя, формирует своего рода корпус микросхемы. Данная конструкция может выдерживать необходимые испытания в составе аппаратуры.

В зависимости от требований по применению полученную сборку можно упаковывать в заданные корпуса, используя также флип-чип-метод либо разварку, или далее напрямую монтировать на плату, заливая компаундом и получая готовое изделие.

Аналогично кремниевой сборке проводилась работа с другими типами подложек (рис. 5). В каждом конкретном случае режимы термокомпрессии подбирались индивидуально, проверялись на рентгеновском микроскопе и испытывались на сдвиг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают гибкость и экономичность флип-чип-монтажа как метода интеграции кристаллов в многофункциональные высокопроизводительные микросистемы без необходимости проведения редизайна структуры кристаллов.

Данная технология дает возможность совмещать в одном корпусе произведенные по различным технологиям цифровые и аналоговые схемы, память и микроэлектромеханические

системы (МЭМС). Позволяет увеличить степень интеграции компонентов микросистемы, а также быстродействие, уменьшить влияние паразитных составляющих межсоединений, что благотворно сказывается на массогабаритных показателях.

Освоены конструктивно-технологические решения с применением керамики, Rogers, FR4, полиимида, кремния как материала подложки, в сочетании с кристаллами кремния, арсенида и нитрида-галлиевых структур, гибридного исполнения с SMD-компонентами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
2. Вертянов Д. В., Бураков М. М., Кручинин С. М., Сидоренко В. Н., Брыкин Л. В. Трехмерная микросборка на основе коммутационных плат из кремния и бескорпусных элементов МЭМС // Наноиндустрия, 2018. Спецвыпуск (82). — С. 521–531.
3. Сидоренко В. Н., Вертянов Д. В., Долговых Ю. Г., Ковалев А. А., Змеев С. В., Тимошенко С. П. Конструктивно-технологические особенности flip-chip-монтажа кристаллов в производстве высокоинтегрированных 2,5D- и 3D-микросборок // Наноиндустрия, 2018. — № 9.
4. Oppert T., Dohle R., Schübler F., Franke J. Solder Bumping and Processing of Flip-Chips with a Solder Bump Diameter of 30 µm or 40 µm // Proceedings of International Conference on Electronics Packaging (ICEP) 2011, Nara, Japan, 2011.
5. Franke J., Dohle R., Schübler F., Oppert T., Härter S. Processing and Reliability Analysis of Flip-Chips with Solder Bumps Down to 30 µm Diameter // Proceedings of the 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Lake Buena Vista, 2011.

www.technosphera.ru

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

www.technosphera.ru

ЭЛЕКТРОНИКА НАРТА ТЕХНОЛОГИИ ЛАСЕРОВ НАНОИНДУСТРИЯ ФОТНИКА ПЕРВАЯ МИЛЯ Аналитика СТАНКОИНСТРУМЕНТ

Цифровая Экономика