

## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Сегодня разработчики радиоэлектронных систем постоянно работают над уменьшением их габаритов, массы, повышением быстродействия, помехоустойчивости и надежности. Так, были разработаны новые принципы и технологии формирования соединений между компонентами аппаратуры, позволяющие отказаться от применения корпусов, в которых ранее эти компоненты размещались. Такие конструкции называются по-разному: многокристалльными модулями (МКМ), гибридными сборками в масштабе пластины, сборками по технологии внутреннего монтажа, высокоинтегрированными сборками внутри подложки и др. Основная цель разработки таких конструкций – добиться максимально плотного размещения бескорпусных компонентов электроники с короткими электрическими связями между ними.

Многокристалльные конструкции по размерам и быстродействию максимально приближаются к СБИС, выполненным целиком на одной пластине. В результате почти за двадцатилетний период развития этого направления удалось уменьшить размер изделий в 3–10 раз для плоских МКМ и в 40–50 раз для объемных трехмерных МКМ 3D, повысить быстродействие в 3–7 раз и улучшить другие показатели по сравнению со стандартными технологиями упаковки, в которых применяется монтаж корпусированных компонентов на печатных платах.

Сегодня существуют сотни конструкторско-технологических вариантов получения МКМ, которые можно условно сгруппировать по функциональному назначению: мало-мощные (не требующие специального теплоотвода); средней мощности (у которых теплоотводом служит теплопроводящая монтажная плата); большой мощности (с принудительным охлаждением МКМ).

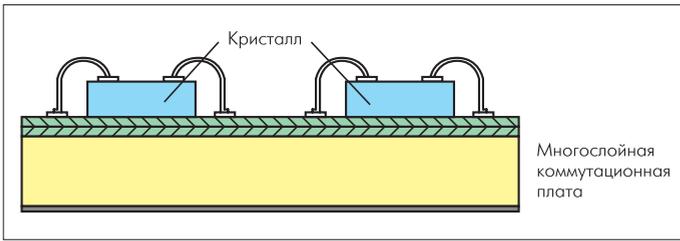
Кроме этого, конструкции МКМ значительно различа-

Б.Черный, к.т.н., А.Черный  
irmatrix@angstrem.ru  
alch701@mail.ru

ются по быстродействию, наличию кристаллов с оптоэлектронными связями, элементами микромеханики и т.д.

Несмотря на разнообразие конструкций МКМ, у них есть общая черта: электрические связи между кристаллами, как правило, обеспечиваются посредством многослойной платы (гибкой или жесткой). Различия в конструкциях обусловлены способами соединения контактных площадок платы кристалла с контактными площадками платы. Во всех вариантах МКМ бескорпусные кристаллы интегральных схем (ИС) соединяются с поверхностью многослойной коммутационной платы одним из трех методов: проволочным монтажом, монтажом методом перевернутого кристалла со столбиковыми выводами на его контактных площадках (flip-chip) и вакуумным напылением металлических проводников на предварительно сформированную планарную конструкцию "подложка-кристалл".

Кристалл устанавливают на многослойную коммутационную плату, и его контактные площадки соединяются алюминиевой или золотой проволокой с контактными площадками платы (рис.1). Плата может быть изготовлена из слоистого пластика, керамики, кремния, металла и других материалов. Проволочные соединения реализуются методом термокомпрессии, ультразвуковой сваркой, микропайкой. Используются также кристаллы с предварительно присоединенными проволочными выводами или собранные на ленте-носителе с автоматической разваркой выводов. Такой была конструкция первых МКМ, но и сейчас эта технология является самой массовой. Простота и надежность давно отработанных процессов получения многослойных плат и методов коммутации проволочными выводами обеспечивают полную температурную и механическую развязку между самими компонентами МКМ, а также между компонентами и подложкой. Кроме того, отсутствует жидкостная обработка в процессе сборки. Это обеспечивает высокий процент выхода и надежность МКМ. Недостаток технологии – низкая плотность упаковки, наличие

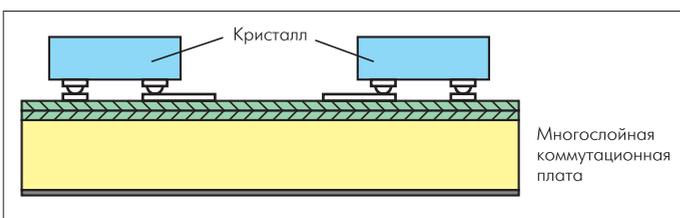


**Рис. 1. Монтаж кристалла на многослойную коммутационную плату**

паразитных емкостей и индуктивностей проволочных соединений и, как следствие, небольшой (в 1,5–2 раза) выигрыш по сравнению с корпусированной сборкой.

Вариант конструкции МКМ с монтажом кристаллов методом flip-chip (рис.2) существенно повышает плотность упаковки и быстродействие МКМ. Однако, несмотря на то, что конструкция кристаллов с шариковыми (столбиковыми) выводами была разработана еще в 70-е годы прошлого столетия, а образцы МКМ и их мелкосерийное производство появились около 20 лет назад, к массовому производству промышленность подходит только сейчас. Основная причина здесь – жесткая связь кристалла с подложками, ограничивающая величину коэффициента температурного расширения (ТКЛР) материала подложки. Идеальной подложкой для такой конструкции является кремниевая пластина, на которой с помощью известных технологий производства БИС формируется многослойная пленочная разводка, а кристаллы, имеющие на своих КП золотые или паяемые объемные выводы, соединяются с такой разводкой методом пайки. МКМ на кремниевых подложках выпускаются и сегодня, однако массовой или крупносерийной эта технология не стала из-за высокой стоимости. Использование технологии кремниевых БИС ограничивает число токопроводящих слоев подложек МКМ до 3–4. Поэтому нужно увеличивать плотность формирования проводников до величины 10000 см/см<sup>2</sup> и более. Необходимость же поддержания требуемого процента выхода годных определяется величиной допустимых дефектов, которая составляет не более 0,1 дефект/см<sup>2</sup> [1]. Следовательно технологические процессы формирования многослойных кремниевых подложек должны проводиться в условиях очень высокой культуры производства, а это резко увеличивает их стоимость.

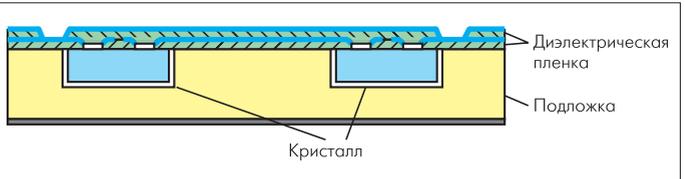
Поскольку рассматриваются МКМ с предельной величиной быстродействия, то следует отметить еще одну про-



**Рис.2. Монтаж кристаллов методом flip-chip**

блему, вызванную ограничением числа слоев. Известно, что для работы в гигагерцевых диапазонах частот оптимальным параметром полосковых линий является ширина проводника 40–70 мкм, толщина 5–10 мкм на слоях диэлектрика 10–20 мкм. Получить проводники с такими размерами очень трудно, поэтому приходится разрабатывать сложные конструкции получения полосковых линий на тонких и узких проводниках и тонком диэлектрике, что также повышает стоимость МКМ. Тем не менее МКМ типа "кремний на кремнии" выпускаются для военной промышленности, когда высокие плотность упаковки и быстродействие играют решающую роль, а также для аппаратуры, работающей при сверхнизких температурах.

Чтобы снизить стоимость конструкции МКМ, разработчики предлагают многочисленные способы перехода на более дешевые подложки. Применение керамических подложек вместо кремниевых незначительно снижает стоимость МКМ, а при использовании кристаллов СБИС размерами более 10x10 мм разница между ТКЛР этих подложек и кремниевых кристаллов становится недопустимой. Поэтому наиболее приемлемое решение этой проблемы – разработка



**Рис.3. Планарная конструкция МКМ**

такой конструкции объемных выводов, которая обеспечивает термическую развязку с подложкой. Предлагаются выводы в виде удлиненных столбиков из эластичных паяемых материалов типа сплава "олово-свинец". Не менее эффективны БИС, выпускаемые в конструктивном исполнении CSP (на всей лицевой поверхности кристалла с помощью дополнительных слоев формируется матрица шариковых выводов из припоя Ø250–400 мкм и такой же высоты). Такие размеры выводов в сочетании с заполнением промежутка между кристаллом и платой органическими компаундами позволяют получать достаточно надежные МКМ при термоциклах. Предлагаются и другие решения – например, коммутация столбиковых выводов кристалла с платой производится при помощи эластичного токопроводящего клея.

На рис. 3 показана типовая конструкция МКМ с утопленными в подложку кристаллами, коммутацией их контактных площадок и многослойной разводкой методом тонкопленочной технологии. Такую конструкцию МКМ называют планарной. Для подложки применяются различные материалы: пластмасса, керамика, металл, на которых делаются углубления, соответствующие размеру кристалла. После того как кристалл, размещен в углубление подложки, на ее поверхности формируется слой диэлектрической пленки, обычно полиимидной, которая обеспечивает пла-

нарность подложки и служит межслойным диэлектриком. Эта конструкция позволяет достичь предельных величин по плотности упаковки компонентов и быстродействию МКМ, уменьшает толщину модуля и исключает из технологического процесса операции пайки или сварки. Описание подобных конструкций МКМ и патенты на них появились почти одновременно с ранее рассматриваемыми конструкциями, однако сообщений о массовом выпуске планарных дешевых МКМ не обнаружено. Отмечается, что основной причиной высокой стоимости является низкий процент выхода годных изделий [2]. Низкий выход годных изделий объясняется не только традиционными загрязнениями. Большинство дефектов возникает из-за напряжений в результате разности термических свойств материалов, применяемых в технологии изготовления многоуровневых межсоединений. Высокотемпературные стадии технологии при имидизации полиимида (300–400°C) приводят к короблению пластины, что создает трудности в последующих процессах фотолитографии. Но основной вклад в снижение процента выхода годных изделий вносит нарушение целостности проводников. Следует отметить проблемы, порождаемые методом жидкостной фотолитографии, в процессе которой растворы проявления и травления металла попадают в зазоры между кристаллом и подложкой. Для решения этих проблем предлагаются различные способы снижения температуры при формировании слоев (замена полиимида париленом и др.), а также применение "сухих" методов травления слоев.

Чтобы радикально снизить стоимость МКМ, следует исключить жидкостный метод фотолитографии. Наиболее перспективным методом, по мнению авторов, является метод свободных масок (МСМ), который позволяет формировать рисунок требуемой конфигурации непосредственно на подложке с помощью вакуумного напыления и ионно-плазменного травления металлических и диэлектрических пленок (в том числе на рельефной поверхности). В результате удается получить необходимое число слоев с толщиной, оптимальной для быстродействующих МКМ. Кроме того МСМ по сравнению с методом фотолитографии сокращает технологический цикл формирования слоев, потребление материалов и химикатов на 60–70%, не требует дорогостоящего оборудования, спецэнергетики, сливных сооружений и представляет собой экологически чистое производство [4–10]. В 1987–1990 годах на одном из предприятий г. Москвы была освоена промышленная технология планарных радиационно стойких МКМ на поликоровых подложках с использованием МСМ и числом кристаллов в модуле до 30 шт.

Рассмотренные конструкции МКМ пригодны для получения объемных (трехмерных) МКМ 3D, представляющих собой сложную многослойную конструкцию из плоских двухмерных МКМ, каждая из которых имеет торцевые контактные площадки для организации периферических связей. При этом в реальных конструкциях МКМ 3D используются плоские МКМ различного типа. Так, в одной из последних

разработок МКМ 3D специалистами пяти стран Евросоюза использованы плоские модули с кристаллами на шариковых выводах и планарных МКМ с пленочной разводкой [3].

Для всех рассматриваемых конструкций МКМ процент выхода годных изделий определяется не только дефектностью, вносимой технологией, но и наличием неработающих компонентов, которые выявляются на конечной стадии изготовления МКМ. И здесь остро стоит проблема годного кристалла. Если для МКМ с проволочной сборкой возможен демонтаж негодного кристалла с последующей разваркой на резервные участки контактной площадки платы, то ремонт МКМ с кристаллами, имеющими объемные выводы, при их плотной упаковке, и в особенности при большом числе выводов, крайне затруднителен, а для планарной конструкции МКМ демонтаж кристалла и вовсе невозможен. Поэтому изготовителям МКМ необходимо получать годные кристаллы, прошедшие все необходимые измерения и испытания. За рубежом все поставляемые кристаллы проходят дополнительные проверки и испытания. При этом стоимость заведомо годных кристаллов может значительно (в 1,5–5 раз) превышать стоимость корпусированной ИС.

На основании краткого анализа уровня и направлений развития технологии и конструкции МКМ можно сформулировать некоторые рекомендации предприятиям – потенциальным изготовителям модулей.

1. Изготовление МКМ с проволочной разваркой выводов могут освоить предприятия, имеющие технологии высокоточных печатных плат, в которых применяются заведомо годные кристаллы промышленного выпуска с проволочными выводами или на полиимидных носителях.

2. Изготовление МКМ с кристаллами, имеющими объемные выводы, и планарных МКМ могут освоить предприятия, у которых есть возможность получать заведомо годные кристаллы. При отсутствии таких возможностей можно рекомендовать, на первый взгляд, парадоксальное решение: минуя стадию освоения плоских МКМ, приступить к разработке более сложных объемных МКМ 3D. Каждый слой объемного МКМ 3D представляет собой плоскую МКМ размером, как правило, около 20x20 мм, в которой размещаются один или несколько кристаллов. Наличие периферийных контактных площадок позволяет проводить тестирование и испытания каждого слоя МКМ и отбраковывать негодные.

3. МКМ – сложная конструкция, и в ее создании участвуют специалисты разных направлений. Поэтому традиционный процесс, при котором разработчики создают схемы в соответствии с их электрическими характеристиками, а затем передают их специалистам по сборке, испытаниям и т.д., к успеху не приведет. Иными словами, разработчик должен работать не только как специалист-схемотехник, но и как технолог высшего класса. Помимо глубокого знания своей специальности, он должен разбираться в вопросах автоматизированного проектирования и ав-



томатизации инженерного труда, в материалах, технологии производства и особенно в технологии монтажа на поверхность плат, в методах испытаний, тепловых расчетах, иметь представление об СВЧ-технике и методах подавления электромагнитных и высокочастотных помех [11].

4. Как уже говорилось, основные трудности при изготовлении МКМ связаны с наличием годного кристалла и обеспечением качества технологии. Ведь достаточно одного бракованного кристалла или одной разорванной связи, и весь дорогостоящий модуль становится неработоспособным. Поэтому важнейшими условиями выпуска МКМ являются опыт изготовления, тестирования кристаллов БИС и высокая технологическая культура производства. Примечательно, что лучшими производителями МКМ за рубежом стали предприятия-изготовители БИС (IBM, INTEL, NEC и др.).

5. Многообразие задач РЭА порождает потребность в многообразии конструктивно-технологических исполнений МКМ. Это относится к материалам, методам обработки подложек, формированию на них диэлектрических и металлических слоев, коммутациям к ним кристаллов, соединению слоев плоских МКМ между собой, получению металлической разводки по их торцевым плоскостям, герметизации и т.д. Поэтому предприятию необходимы соответствующий парк технологического и механообрабатывающего оборудования, обеспечение возможности оперативного изготовления оснастки, приспособлений и др. Очевидно, что разрабатывать и выпускать заведомо годные кристаллы БИС, в том числе кристаллы с объемными выводами, могут только предприятия-изготовители ИС и полупроводниковых приборов. Предприятия, имеющие опыт изготовления кристаллов с проволочными выводами и на полиимидных носителях, способны быстро освоить и выпуск МКМ, так как измерительная и испытательная база для БИС пригодна для измерений и испытаний МКМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kwong O.K., Fabian R., Pease W. Closely packed microstriplines as very high-speed chip-to-chip interconnects. – IEEE Trans. of components, hybrids, and manufacturing technology. Vol. CHMT-10, №3, September 1987, p. 314–320.

2. McGonald, Lin J., Majid H., Greub N., Philhower H., Dabral R. New systems for fabrication of wafer scale interconnections in multichip packages. Electronics Conference, 1988, Proceedings of the 38th, 9–11 May 1988, p. 305–314.

3. Hiding Dies – High Density Integration in Dies info Electronics Substrates, 2004, www.hidingdies.net

4. Черный Б.И. Развитие технологии многокристальных модулей. – Всероссийская научно-техническая конференция "Микро- и наноэлектроника-98", т. 1, P1-54, Звенигород, 1998.

5. Черный Б.И. Применение метода свободных масок в технологии коммутации кристаллов СБИС. – Всероссийская научно-техническая конференция "Микро- и наноэлектроника-2001", т. 2, P3-16, Звенигород, 2001.

6. Черный Б.И. Анализ факторов, определяющих точность метода свободных масок. – Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 1996, №4, с. 48–50.

7. Черный Б.И. Перспективы применения свободных масок в технологии ИЭТ. – Электронная техника. Сер.6. ТОПО, 1985, вып. 6, с. 28–33.

8. Черный Б.И. Экономическая эффективность применения свободных масок в технологии ИЭТ. – Электронная техника. Сер.6, ТОПО, 1983, вып. 5, с. 71–74.

9. Черный Б.И., Ушева М.К. Способ изготовления масок. – А.с. №1097175. Оpubл. в Б.И., 1984, №21.

10. Черный Б.И. и др. Способ формирования межуровневых отверстий в диэлектрических пленках. – А.с. №1130142. Оpubл. в Б.И., 1984, №46.

11. Lyman J. Components and packaging. – ED, 1989, №.1, p.118–120, 122, 124, 128.