

Технологические особенности монтажа Flip-Chip

В статье рассмотрены технологические особенности процессов монтажа Flip-Chip кристаллов интегральных схем на подложки, включая формирование объемных выводов, применение анизотропных проводящих пленок, методов ультразвуковой и термозвуковой пайки и сварки.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Игорь Петухов

petuchov@kbtm.by

Сергей Волкенштейн

wolkenstein@kbtm.by

Дмитрий Барбарчук

Процесс монтажа Flip-Chip заключается в присоединении полупроводникового кристалла интегральной схемы на подложку активной стороной вниз. Выводы кристалла могут быть выполнены из проводящего полимера, а также представлять собой металлические шарики или столбики металла (Au, Cu), припоя или металлические контактные площадки. Методы присоединения кристаллов по технологии Flip-Chip включают ультразвуковую и термозвуковую сварку, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайку оплавлением [1]. Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок (по сравнению с контактными площадками, расположенными по краю кристалла) и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности. Наиболее широко эта технология применяется в модулях для часов, смарт-картах, микроконтроллерах и операционных усилителях с количеством выводов до 200. Основные недостатки этого метода — худшие тепловые характеристики (по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом) и трудность герметизации матрицы контактных площадок.

При автоматизированном монтаже кристаллов на ленточном носителе столбики из золота получают электролитическим осаждением на алюминиевых контактных площадках кристалла после вскрытия пассивирующего слоя (рис. 1) [2]. После ионной очистки наносят контактный барьерный слой толщиной 100 нм, являющийся проводящим при электролитическом осаждении золота. Критической операцией, влияющей на выход годных приборов, является селективное травление слоев, нанесенных вакуумным или ионно-лучевым распылением. При химическом травлении этих слоев реактив может проникать в пассивирующее покрытие и растворять алюминиевое межсоединение. Для избежания технологических потерь применяют плазменное травление, что удорожает стоимость изделий. Формирование столбиков припоя гальваническим методом или напылением имеет определенные не-

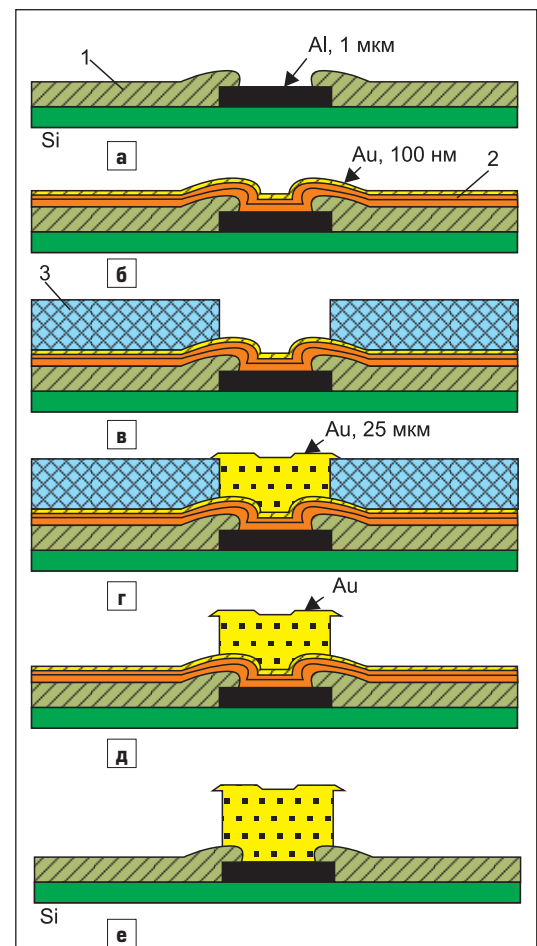


Рис. 1. Формирование золотых столбиков на алюминиевых контактных площадках: а) пластина после операций очистки и ионного травления; б) создание контактного барьерного слоя со слоем золота для предотвращения окисления; в) нанесение фоторезиста; г) электролитическое осаждение слоя золота; д) снятие резиста; е) удаление проводящих тонких пленок химическим травлением: 1 — оксид кремния 1–1,5 мкм; 2 — контактный барьерный слой 100 нм; 3 — фоторезист 25 мкм

достатки, такие как сложность процесса или высокая стоимость оборудования.

Для формирования столбиков припоя на алюминиевых контактных площадках кристалла применен процесс химического осаждения слоя никеля 2 мкм и ультразвуковая (УЗ) пайка [3]. Кремниевая пластина диаметром 120 мм имела контактные площадки площадью 100 мкм² со слоем алюминия толщиной 1,0 мкм.

На кристалле размером 3,5×5,0 мм располагалось 78 контактных площадок. Пластина активировалась Pd после промывки в серной кислоте, затем в воде. При этих условиях пористый слой Pd толщиной 50 нм селективно осаждался на площадках по реакции $Pd^{2+} + 2e \rightarrow Pd$. После промывки водой методом химической металлизации формировался слой Ni-P толщиной 2 мкм на слое Pd. Далее пластина выдерживалась при температуре 150 °С в течение 30 мин.

Кремниевая пластина погружалась в волну припоя, создаваемую мотором, при температуре 220–240 °С (рис. 2). УЗ колебания частотой 16,5±2 кГц от преобразователя вводились в волну припоя с помощью наконечника, одновременно в эту область для снижения окисления припоя со скоростью до 5 л/мин подавался защитный газ — азот.

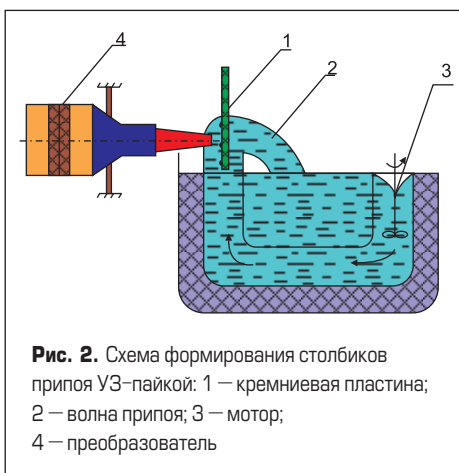


Рис. 2. Схема формирования столбиков припоя УЗ-пайкой: 1 — кремниевая пластина; 2 — волна припоя; 3 — мотор; 4 — преобразователь

Для формирования первой ступени столбика пластина погружалась в жидкий припой 99Pb-1Sn с температурой пайки 360–400 °С — таким образом, чтобы контактные площадки находились напротив УЗ-излучателя. Затем пластина погружалась в припой Sn-37Pb при температуре 200–240 °С для формирования второй ступени. Высота столбиков после первого этапа находилась в пределах 12–16 мкм, после второго этапа — 18–22 мкм. Средняя прочность на отрыв после первого этапа составила 20 г на площадку, а после второго — 26,8 г. На межфазной границе при этом формировался интерметаллид NiSn, который приводит к хорошей надежности соединения.

Процесс сборки методом перевернутого кристалла с помощью столбиков припоя (рис. 3) начинается с последовательного напыления Cr, Cu и Au через металлическую маску на все алюминиевые контактные площадки на пластине. Контактные площадки могут быть расположены в любой области

на поверхности кристалла (с некоторыми ограничениями). Золото предохраняет тонкопленочную структуру от окисления до нанесения на покрытие Cr-Cu-Au последующих слоев Pb-Sn. Пленку Pb-Sn осаждают на большей площади по сравнению с площадью, занимаемой контактными площадками с покрытием Cr-Cu-Au. Площадь и толщина этой осажденной пленки определяют окончательные размеры шарика. После напыления готовую структуру помещают в камеру с пониженным давлением, где благодаря силам поверхностного натяжения с пленки Pb-Sn удаляется окисный слой, и образуется шарик припоя с площадью основания, определенной размерами покрытия Cr-Cu-Au.

Для оптимизации конструкции необходимо свести к минимуму деформации сдвига в объеме припоя во время термоциклирования и обеспечить максимально возможную прочность соединения на поверхности раздела между кристаллом и подложкой. Прочность на разрыв соединения поверхностей раздела кристалл-припой и подложка-припой оптимизируется выбором такой контактной площади подложки, чтобы при испытаниях на термоциклирование и скручивание эти две поверхности раздела разрушались в равной степени. Это условие достигается выравниванием поверхностных напряжений.

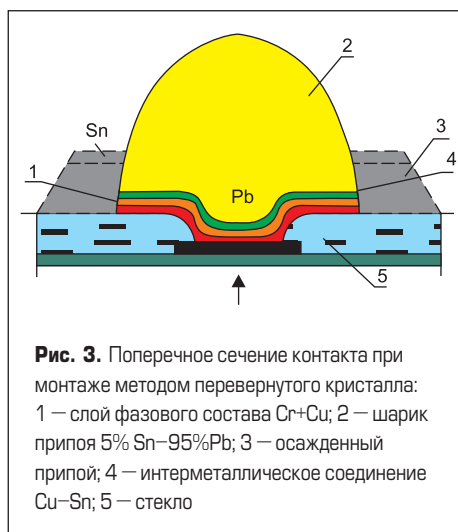


Рис. 3. Поперечное сечение контакта при монтаже методом перевернутого кристалла: 1 — слой фазового состава Cr+Cu; 2 — шарик припоя 5% Sn-95%Pb; 3 — осажденный припой; 4 — интерметаллическое соединение Cu-Sn; 5 — стекло

Некоторые сложности для кристаллов СБИС связаны с тем, что не все столбики припоя расположены на равном расстоянии от нейтральной точки, где происходит выравнивание поверхностных напряжений. С увеличением этого расстояния при неизменных размерах соединений, время до разрушения в цикле усталостных испытаний уменьшается. Если необходимо поддержать это время на прежнем уровне, то для сохранения оптимальных условий радиус шарика припоя может быть увеличен вместе с другими размерами. Чем больше радиус шарика, тем больше область для осаждения припоя и, следовательно, расстояние между контактными площадками. Столбики из эвтектического припоя на контактных площадках кристалла могут быть сформированы методами гальванопластики или трафаретной печати па-

альной пасты. В первом методе необходимо нанесение жидкого флюса на кристалл погружением, распылением или дозированием. В этих случаях флюс в виде пасты наносится на вращающийся диск, где его толщина примерно 50 мкм контролируется зазором между ракем и диском. Кристалл с помощью манипулятора погружается во флюс и затем устанавливается на плату. Распылением наносят жидкие флюсы с содержанием растворителей до 95–98% и имеющие вязкость 7–30 мПа·с. Клеящие свойства флюса должны быть достаточны для удержания кристалла при перемещении платы и пайке оплавлением.

Проблемы, возникающие при монтаже методом Flip-Chip, связаны со смещением кристалла вследствие недостаточной клейкости и низкой активности флюса, невысокой точности автомата установки, повышенного окисления вследствие неоптимального температурного профиля пайки.

Анизотропные проводящие пленки (АПП) — это хорошо известные адгезивы, включающие проводящую составляющую и связующую полимерную смолу в виде пленки. В последние десятилетия они широко используются как соединительные материалы в плоских дисплеях с применением проводного соединения, для гибкого соединения печатных плат, соединения кристалл на подложке (COB) и кристалл на пленке (COF), а также монтажа полупроводниковых кристаллов методом Flip-Chip. Разработана технология COB-монтажа с использованием АПП под воздействием ультразвуковых колебаний [4]. АПП на основе эпоксидной смолы содержала в качестве проводящего составляющего шарики Ø5 мм из NiAu. Установка присоединения кристалла состояла из УЗ-преобразователя, наконечника, электрического нагревателя и датчика (рис. 4). Продольные УЗ-вибрации частотой 40 кГц и выходной мощностью 100 Вт создавали амплитуду колебаний 10 мкм.

В течение УЗ-сварки на наконечник действовала сила в 19 Н. Для предотвращения образования дефектов в полупроводниковом кристалле (трещины, дробление) на острие наконечника имелась тефлоновая насадка толщиной 500 мкм. При УЗ-сварке температура слоя АПП достигала +300 °С за 2 с.

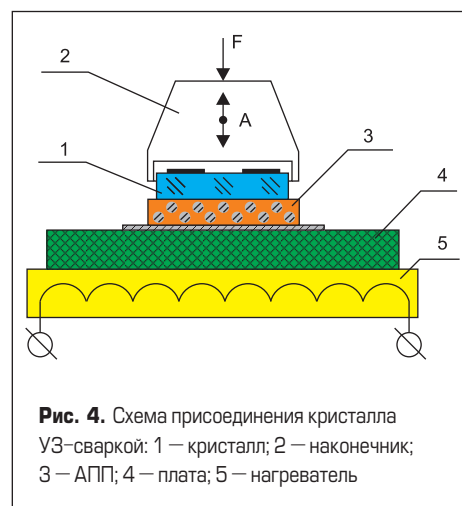
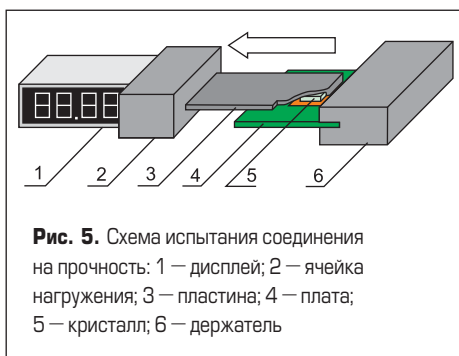


Рис. 4. Схема присоединения кристалла УЗ-сваркой: 1 — кристалл; 2 — наконечник; 3 — АПП; 4 — плата; 5 — нагреватель

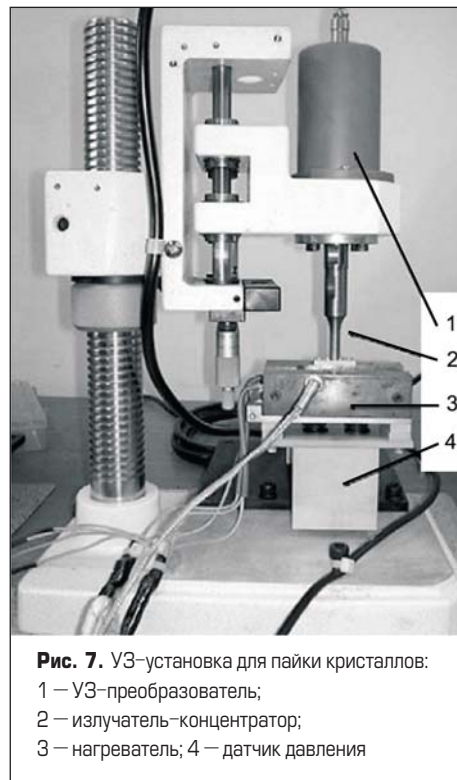
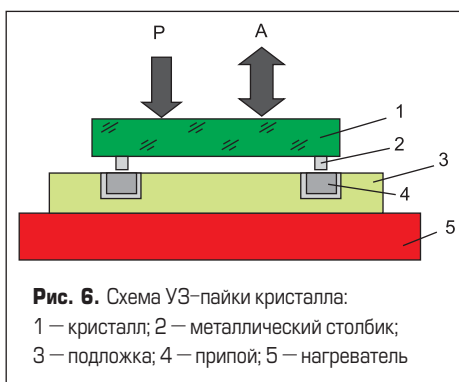
Исследована прочность сцепления АПП с платой после ультразвуковой и термокомпрессионной сварки. АПП были приварены к стеклотекстолиту FR4 и стеклянной подложке при +80 °С, пробные кристаллы центрированы на подложке с помощью держателя. В расположенных кристаллах на подложке в процессе сварки измерены силы срезания при 0,3; 0,6; 1; 2; 3; 5; 7 с.

Испытание прочности на срез выполнено при скорости перемещения захвата 3 см/мин (рис. 5). Прочность сцепления в образцах на FR4-подложке при УЗ-сварке примерно на 20% меньше, чем при ТК-сварке. В обоих случаях прочность значительно увеличивается при термообработке АПП и достигает максимальной величины за 5 с.



Продольные УЗ-колебания совместно с давлением традиционно применяются для сварки термопластиков с помощью вязкоупругого нагрева [5]. Этот процесс был применен для электронных и электронно-механических сборок со столбиками из Au [6], где соединение в твердой фазе образовывалось между Au-столбиком и контактной площадкой кристалла вследствие значительной пластической деформации. Это метод с использованием продольных УЗ-колебаний имеет преимущества перед аналогами в выравнивании и копланарности между кристаллом и подложкой.

Поскольку припой является вязкоэластичным материалом, то вследствие его низкой температуры плавления ползучесть и снижение напряжений имеют место даже при комнатной температуре. Это дает возможность предположить, что припой может быть нагрет продольными УЗ-колебаниями. Схема предлагаемого метода УЗ-пайки показана на рис. 6. Когда металлические столбики на кристалле совмещены с отверстия-



ки в подложке, заполненными припоем, к кристаллу прилагаются продольные УЗ-колебания и давление. Как только припой становится мягким и плавится, металлические столбики внедряются в припой, создавая соединение. Металлический столбик действует как концентратор УЗ-энергии. Нагреватель снизу подложки используется для предварительного подогрева припоя ниже температуры его плавления.

Столбик из Cu шириной 0,5 мм и высотой 2,0 мм был внедрен в припойный блок с использованием частоты 28 кГц в течение 4 с при давлении 382 Па. Припой был подогрет до 160 °С, его температура вблизи медного столбика измерялась с помощью термопары.

В случае столбика из Au на подложке формировался слой металлизации с помощью катодного распыления слоев: Al, Ti-W; золотые столбики были изготовлены в виде гвоздика с большой шляпкой, как показано на рис. 8.

Диаметр и высота столбиков из золота были 95 и 40 мкм соответственно. На чипе размером 8×8 мм располагалось 9 таких столбиков. Плата из стеклотекстолита FR4 была просверлена с помощью лазера для создания отвер-



стий Ø150 мкм и глубиной 200 мкм. Слой Cu наносился гальваническим способом, а отверстия были заполнены эвтектическим припоем с использованием метода выравнивания горячим газом. УЗ-колебания частотой 40 кГц при давлении 255; 451 и 647 кПа прилагались в течение 0,5; 1,0 и 2,0 с. Уровни УЗ-энергии на частотах 28 и 44 кГц фиксировались во время эксперимента.

Микроструктуры столбиков припоя наблюдались с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии, а интерметаллические соединения исследовались с помощью анализатора-спектрометра рассеянной энергии (EDS). Для определения оптимальных параметров процесса соединения измерялась прочность на растяжение соединения со столбиками из золота. На каждый параметр процесса — время соединения и давление — испытывалось 8 образцов.

Хотя температура линейно зависит от УЗ-частоты, ее увеличение происходит более быстро в зависимости от амплитуды, поскольку амплитуда связана с напряжениями в материале. Однако частота и амплитуда в УЗ-машине связаны таким образом, что оба эти параметра являются неконтролируемыми. Хотя размеры медного столбика практически не влияют на температуру, размеры припоя, в особенности его высота, влияют на температуру значительно. С уменьшением высоты припоя напряжения растут, и большее количество тепла генерируется в малом объеме припоя. Поскольку более высокая температура может быть получена в меньшем объеме припоя, то это дает преимущества для плотно упакованных электронныхборок. Следует отметить, что припой будет вязкоэластично деформироваться и плавиться, когда температура эвтектического припоя приближается к точке плавления +183 °С. На межфазной границе наблюдается слой расплавленного припоя толщиной 150 мкм, что свидетельствует о том, что локальный нагрев при УЗ-пайке возможен.

Температура увеличивалась непрерывно и достигла +183 °С за 3,3 с. Максимум температуры ограничен, потому что тепло рассеивалось через большой блок припоя за счет теплопроводности. Результаты EDS-анализа показали, что интерметаллическое соединение Cu₆Sn₅ не присутствует на межфазной границе. Учитывая, что скорость растворения Cu в Sn составляет 2 мкм/с при +200 °С, очевидно, что низкая температура подогрева припоя до +160 °С и короткое время образования соединения при температуре плавления (менее 1 с) предотвращают рост интерметаллида на межфазной границе. Основываясь на экспериментальных результатах, установлено, что локальный нагрев возможен, а интенсивного образования интерметаллида на межфазной границе можно избежать при использовании метода УЗ-пайки.

Поперечное сечение паяных Au-столбиков показано на рис. 9, когда время воздействия УЗ составляло 0,5; 1,0 и 2,0 с при давлении 451 кПа и предварительном нагреве до +160 °С. Для времени соединения 0,5 с микроструктура

эвтектического припоя на рис. 9а не претерпела значительных изменений, так как генерации тепла в течение 0,5 с недостаточно для значительного расплавления припоя. Хотя интерметаллическое соединение и образовывалось на межфазной границе, его состав не мог быть измерен EDS-методом, так как слой интерметаллида был менее 1 мкм. Когда время соединения было увеличено до 1 с, весь объем припоя расплавился (рис. 9б). Интерметаллид образовался на межфазной границе, и его игольчатая структура распространилась по всей площади припоя. Когда время соединения было увеличено до 2 с, то большая часть Au-столбика растворилась в расплавленном припое, и наблюдалась морфология толстого слоя интерметаллида (рис. 9в). Хотя скорость растворения Au в Sn составляет 1,33 мкм/с при +204 °С [2], что больше, чем у Cu, но этого недостаточно для полного расплавления золотого столбика за 2 с. Предположительно, полное растворение Au-столбика вызвано высокой температурой вследствие малого объема припоя и актив-

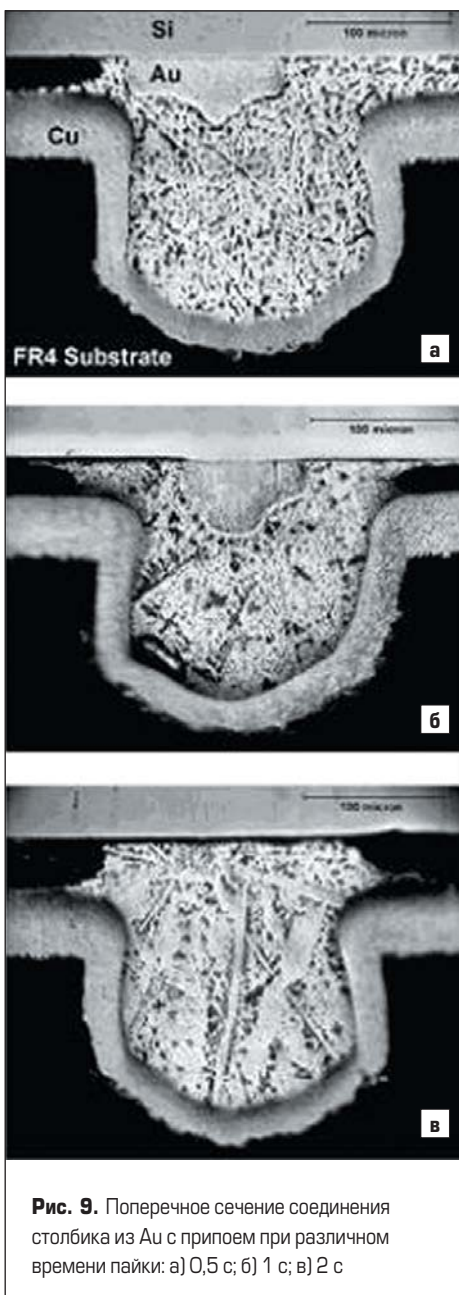


Рис. 9. Поперечное сечение соединения столбика из Au с припоем при различном времени пайки: а) 0,5 с; б) 1 с; в) 2 с

ного эффекта УЗ-воздействия. Быстрое и активное течение при воздействии УЗ удаляет интерметаллид с межфазной границы и новая поверхность Au контактирует с Sn, ускоряя растворение.

В НПО «Планар» разработана конструкция установки монтажа методом Flip-Chip, реализующая термовзвучкой способ соединения, имеющий преимущества за счет значительного снижения температуры процесса и времени цикла. Учитывая, что объемные выводы кристаллов формируются из золотой проволоки и их присоединение происходит к золоченой поверхности, применен УЗ-генератор частотой 66 ± 4 кГц мощностью до 100 Вт, что вполне отвечает требованиям активации процесса группового соединения кристалла и подложки. В условиях получения группового соединения крайне важен достаточный и равномерный прогрев присоединяемых приборов не только со стороны нагревательного столика, но и со стороны инструмента с размещенным на нем кристаллом. Для преобразователей повышенной мощности (до 100 Вт) применена пьезокерамика типа ЦТС-19, обеспечивающая получение значительных амплитуд УЗ-колебаний. Армирование пьезоэлементов клеем ЭЧЭ СЫУа.028.052ТУ при сборке излучателя улучшило характеристики по устойчивости преобразователя.

Методы группового соединения требуют обеспечения точного совмещения соединяемых приборов, что достигается применением полупрозрачного зеркала и микроскопа. Полупрозрачное зеркало, расположенное между кристаллом и подложкой, позволяет получать точное совмещение по фрагментам топологии и имеет преимущества по сравнению с методом совмещения по отпечатку с применением световой указки.

Создание недорогого образца установки для монтажа кристаллов с большим диапазоном количества объемных выводов и вариантов сборок потребовало анализа и опробования различных методов нагружения. Среди них предпочтение отдано варианту нагружения с помощью пневмоцилиндра, который включается на регулируемое время сразу после опускания инструмента и срабатывания датчика касания.

Установка (рис. 10) содержит: блок управления, УЗ-генератор, блок нагрева инструмента, платформу вертикального перемещения сварочной головки, предметный столик с нагревом, сварочную головку, полупрозрачное зеркало, микроскоп и пневмоцилиндр нагружения.

Предметный столик позволяет выполнять точные микроперемещения по координатам x, y, z с помощью винтовых пар качения. Часть пьедестала без подогрева используется как предметный столик для захвата кристаллов. Кристаллы, расположенные на предметном столике россыпью, захватываются вакуумом с помощью инструмента, закрепленного в сварочной головке. После подведения подогреваемого столика под инструмент с захваченным лицевой стороной вниз кристаллом между кристаллом и подложкой вводится полупрозрачное зеркало, предварительно отъюстированное по резкости изображения. Наблюдая в микроскоп одновременное изображение фрагментов топологии кристалла и подложки, полученное через полупрозрачное зеркало, производится совмещение с помощью ручек регулировки координат столика. После совмещения полупрозрачное зеркало возвращается в исходное положение, а сварочная головка, на которой расположен инструмент с кристаллом, опускается по координате z до срабатывания датчика касания, по сигналу которого осуществляется нагружение пневмоцилиндром и подача импульса УЗГ.

В обеспечение качества присоединения предварительно проверяется параллельность торца инструмента относительно поверхности столика, на котором устанавливается подложка. Для этих целей используется тонкая фольга, на которой делается отпечаток инструмента. Отпечаток должен иметь четкий контур торца инструмента. Выставление параллельности относительно подложки осуществляется регулировкой столика.

Основными технологическими параметрами, определяющими процесс группового монтажа кристаллов с объемными выводами, являются: температура подогрева зоны соединения; усилие сжатия в зоне соединения; время присоединения; частота и мощность УЗ-колебаний. При монтаже кристаллов, содер-

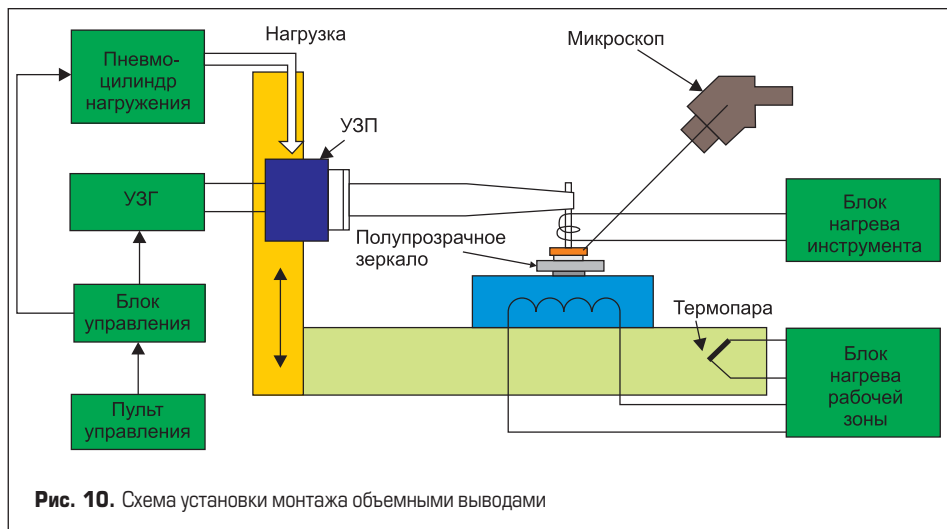


Рис. 10. Схема установки монтажа объемными выводами

жащих 122 объемных микровывода, на кремниевую подложку определены оптимальные режимы процесса: температура нагрева в зоне присоединения +320...+360 °С; время присоединения 30–50 мс; усилие нагружения 60 Н; мощность УЗГ 15 Вт; частота колебаний УЗГ 66 ± 4 кГц. Присоединение достигалось равномерным прижимом и небольшой выдержкой приборов после касания для стабилизации температуры в контактной области.

Для оценки качества присоединения объемных контактных выступов и группового присоединения кристаллов методом Flip-Chip использовались лазерная фотоакустическая диагностика и микрорентгено-телевизионный контроль внутренних дефектов (не сплошностей, неоднородностей, трещин, инородных включений и т. д.). Дефекты, связанные с нарушением сплошности (пустоты, трещины, непропаи, микровключения и т. п.), не всегда могут быть обнаружены существующими методами электронной, инфракрасной или рентгеновской микроскопии. Решение проблемы становится возможным при воздействии на изделие зондирующим лазерным импульсным излучением с регистрацией встроенным в акустическую систему пьезопреобразователем возникающих в результате термоупругой деформации структуры контролируемого изделия акустических волн. Фотоакустический сигнал, снимаемый с датчика, зависит от многочисленных локальных физических свойств выделенной области объекта. При растровом сканировании тонкофокусированным лазерным лучом формируется фотоакустическое изображение объекта, являющееся результатом наложения трех различных процессов: вариации поглощенной мощности излучения вследствие изменения от точки к точке оптических свойств объекта; взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта; взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта. При лазерном зондировании на экране цветного монитора регистрируется 16-градационное цветокодированное поэлементное изображение зон контактирования микросварного соедине-



Рис. 11. Топограммы присоединения объемных микровыводов к контактным площадкам кристалла: а) качественного; б) некачественного

ния с увеличением до $\times 2500$. При этом низкие уровни фотоакустических сигналов свидетельствуют о наличии зон соединений с более однородной структурой, обеспечивающих физический контакт (в виде темных областей), а высокие уровни — о наличии зон с неоднородной структурой, свидетельствующих о нарушении ее сплошности (в виде светлых областей).

Фотоакустические топограммы зон контактирования микровыводов объемного типа с металлизацией контактных площадок кристаллов приведены на рис. 11. Некачественное присоединение объемного микровывода

к контактной площадке кристалла произошло вследствие превышения реальной толщины диэлектрической пленки 225–300 Å относительно предельного значения 150 Å для термовзвучковой микросварки.

Анализ технологических особенностей метода Flip-Chip показывает, что для автоматизированного группового процесса монтажа полупроводниковых кристаллов формирование объемных выводов может быть осуществлено методами гальванической металлизации, термического испарения в вакууме, ультразвуковой пайкой — исходя из заданной плотности монтажа и требуемой точности совмещения при сборке. В условиях многономенклатурного и мелкосерийного производства предпочтительнее методы монтажа термовзвучковой сваркой, не требующие сложного и дорогостоящего оборудования и обладающие гибкостью для различных вариантов сборки.

Литература

1. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии. М.: ИД «Технологии». 2006.
2. Технология СБИС. Т.2. / Под ред. С. Зи. М.: Мир. 1986.
3. Inaba M., Yamakawa K., Iwase N. Solder Bump Formation Using Electroless Plating and Ultrasonic Soldering // IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manuf. Technology. 1990. V. 13. № 1.
4. Lee K., Kim H.-J., Yim M.-J., Paik K.-W. Ultrasonic Bonding Using Anisotropic Conductive Films for Flip-Chip Interconnection // IEEE Trans. on Electronics Packaging Manuf. 2009. V. 32. № 4.
5. Kim J. H., Lee J., Yoo C. D. Soldering Method Using Longitudinal Ultrasonic // IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies. 2005. V. 28. № 3.
6. Li J., Han L., Zhong J. Power and Interface Features of Thermosonic Flip-Chip Bonding // IEEE Trans. on Advanced Packaging. 2008. V. 31. № 3.