

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВОЛОЧНОГО МИКРОМОНТАЖА МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

И. Петухов petuchov@kbtm.by, В. Ланин vlanin@bsuir.by

Преимущества, которые дает 3D-интеграция как способ повышения плотности упаковки современных микроэлектронных приборов, известны: уменьшение размеров, сокращение длины межсоединений за счет замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные, снижение энергопотребления. Многокристальные 3D-модули могут иметь в своем составе пассивные компоненты, микроэлектромеханические системы, оптические компоненты и др., существенно снижая массогабаритные характеристики системы и ее стоимость. Однако при их изготовлении возникают проблемы, требующие поиска новых решений для технологического оборудования, на котором они собираются. Одним из таких решений является повышение частоты ультразвуковых колебаний в установках термозвуковой микросварки.

3D-интегрированные многокристальные модули представляют собой подложки из различных материалов (стекло, керамика, кремний) с кристаллами, установленными как на подложку, так и "этажеркой" – друг над другом. Современный уровень миниатюризации, порождающий повышение плотности монтажа, подразумевает уменьшенный (60–80 мкм) размер контактных площадок на кристалле при малом (40–50 мкм) шаге между соседними контактными площадками и числе выводов более 100. При сборке подобных приборов необходимо использование проволоки малого диаметра (≤ 25 мкм); кроме того, поскольку проволочным монтажом осуществляются не только соединения кристалл-подложка, но и межкристальные соединения, такие модули содержат большое число проволочных перемычек на различных уровнях, что может создавать предпосылки к снижению надежности изделия [1].

Перечисленные обстоятельства с особой остротой ставят проблему воспроизводимости сварного

соединения; под воспроизводимостью в данном случае понимается повторяемость его геометрии по размерами (длина, ширина) и деформации по высоте, а также прочность при контроле соединения на отрыв и сдвиг. Это предъявляет особые требования к установкам проволочного монтажа.

Разработанные в середине 80-х годов для мелкосерийного производства гибридных интегральных схем, ручные установки для микросварки типа ЭМ-4120, ЭМ-4092 не могут в настоящее время обеспечить выполнение требований современного производства широкой номенклатуры изделий электронной техники. Ручные установки просты в управлении, но они устарели – не только из-за использования комплектующих изделий производства 70–80-х годов, но и, главным образом, вследствие необходимости формировать проволочные соединения вручную с помощью манипулятора. Понятно, что качество выпускаемой продукции полностью зависит от квалификации оператора.

Кроме того, в установках ЭМ-4120 и ЭМ-4092 реализован **лишь один** и не самый универсальный метод присоединения: ультразвуковая и контактная сварка соответственно. Сейчас же все большую популярность получает термозвуковая сварка – ТЗС, при которой соединение формируется в результате совместного действия температуры, ультразвуковых (УЗ) колебаний и давления. Основным ее достоинством применительно к монтажу многокристалльных модулей является возможность получения соединения разнородных материалов. При помощи ТЗС можно приваривать золотую проволоку к алюминиевым, золотым и серебряным покрытиям контактных площадок; можно также применять медную или золото-палладиевую проволоку.

В новом поколении микросварочных машин ОАО "Планар" учтены и слабые места ручных установок, и повысившиеся требования к точности и качеству сварки, предъявляемые 3D интеграцией и продолжающимся процессом миниатюризации электронных устройств. Все представители линейки – автоматы и полуавтоматы, в которых достигается независимость результата от человеческого фактора, и во всех реализована технология термозвуковой сварки.

Особое внимание уделено разработчиками обозначенной выше проблеме: обеспечению воспроизводимости сварных соединений. **Напомним, что воспроизводимость включает в себя повторяемость геометрии соединения и его прочность.** При создании надежного соединения должна решаться задача, заключающаяся в себе некоторое противоречие: с одной стороны, необходимо гарантировать, что периметр деформированной зоны сварного соединения не выйдет за пределы контактной площадки, с другой – вынужденное уменьшение размеров соединения, в частности, за счет уменьшения вертикальной деформации, не должно сказываться на его прочности. Рассмотрим вначале вопрос локализации зоны сварки в границах контактной площадки.

В настоящее время до 95% изготавливаемых в мире микросхем используют золотую проволоку для обеспечения надежных межсоединений методом "шарик-клин". В соответствии с этим методом первое соединение петли (так принято называть физическую реализацию межсоединения – переключку между двумя контактами) образуется присоединением предварительно оплавленного шарика на конце проволоки с помощью капилляра со сквозным отверстием, подводящего шарик к месту контакта вертикально ("шарик встык"); а во второй точке петли проволока ложится горизонтально вдоль контакта.

Понятно, что при ширине контактной площадки 60–80 мкм и диаметре проволоки, равном или меньшем 25 мкм, для надежного попадания проволоки на второй контакт петли необходима лишь достаточная

точность работы приводов сварочной головки. А вот качество соединения "встык шариком" определяется в первую очередь стабильностью диаметра и симметрией шарика. При микросварке золотой проволокой диаметром 25 мкм для шариков, образуемых электроискровым методом, стандартным является диаметр, равный 2–2,5 диаметрам проволоки. В абсолютных величинах это составляет от 52,5 до 55 мкм [2], что неприемлемо при указанной выше ширине контактной площадки и шаге соединений 60 мкм: типичный разброс диаметров исходных шариков, равный $\pm 2,5$ мкм, в сумме с погрешностью позиционирования сварочной головки ± 4 мкм и деформацией присоединенного шарика (диаметр деформированной зоны на 8–10 мкм больше исходного диаметра шарика) может привести к выходу сварного соединения за пределы контактной площадки, то есть к возможному повреждению топологии кристалла.

Для исключения такой ситуации необходимо обеспечить исходный (до деформации при сварке) диаметр оплавленного шарика в диапазоне 42,5–45 мкм, или 1,7–1,8 от диаметра проволоки. В связи с этим надо отметить, что разброс по деформации соединений "шарик встык" сильно зависит от выбора геометрии рабочего торца капилляра, поэтому необходимо правильно выбирать капилляр с учетом паспортных отклонений размеров рабочего торца. Получение нужного – уменьшенного – диаметра шарика и перемещение его в зону присоединения сварочной головкой в условиях высокоплотного монтажа приводит к необходимости использования капилляра с утоненным концом (в форме бутылочного горлышка) для исключения касания с соседними соединениями [3]. Такие капилляры создают определенные сложности при передаче УЗ энергии, и для согласования оптимального профиля утонения рекомендуется использовать возможности лазерной интерферометрии, с помощью которой можно не только измерить амплитуду колебаний на торце капилляра простым наведением на него сфокусированного лазерного луча, но и определить узловые точки колебаний капилляра.

Помимо применения проволок малого (≤ 25 мкм) диаметра, дополненного специальными мерами по уменьшению диаметра шарика, для монтажа на малоразмерных контактных площадках приходится уменьшать деформацию шарика при компрессионном воздействии во время сварки – тогда в законченном виде соединение будет иметь большую, чем обычно, высоту и, за счет этого, меньшую площадь основания, гарантированно вписанную в границы площадки. При использовании ТЗС со стандартными параметрами это ведет к снижению прочности соединения. Одним из эффективных способов преодоления этой проблемы может быть

применение УЗ-систем повышенной до 100 кГц и более частоты: экспериментально установлено, что они позволяют получать равнопрочные соединения при меньшей деформации проволоки в процессе сварки [4].

Влияние частоты УЗ-колебаний на прочность выводов из золотой проволоки диаметром 30 мкм при различной температуре зоны сварки исследовалось с использованием двух разработанных ультразвуковых преобразователей, один из которых имел частоту резонанса 110 кГц, а второй – 66 кГц, на установке ЭМ-4060П в процессе сборки приборов на гибких подложках типа Smart Card при температуре не выше 145°C (лавсановый ленточный носитель) и стандартных приборов на металлических лентах при температуре от 100 до 300°C.

Результаты контроля прочности выводов показаны на рис.1. Снижение прочности выводов ниже 200°C определяется в основном ослаблением прочности второй (клиновой) сварки. Ниже 100°C наблюдается не только снижение прочности сварки встык шариком и второй (клиновой) сварки, но и наличие соединений с нулевой прочностью ("отлипы"). Использование УЗ-системы повышенной частоты 110 кГц позволило обеспечить сборку приборов типа Smart Card при температуре 140°C с выходом годных 98,8–99,4%. При этом, как видно из графика, обеспечивается сокращение времени сварки за счет интенсивного размягчения свариваемых материалов и ввода большей величины ультразвуковой энергии.

Полученный результат имеет двойное значение. С одной стороны, он подтверждает решение задачи достижения требуемой прочности соединения при

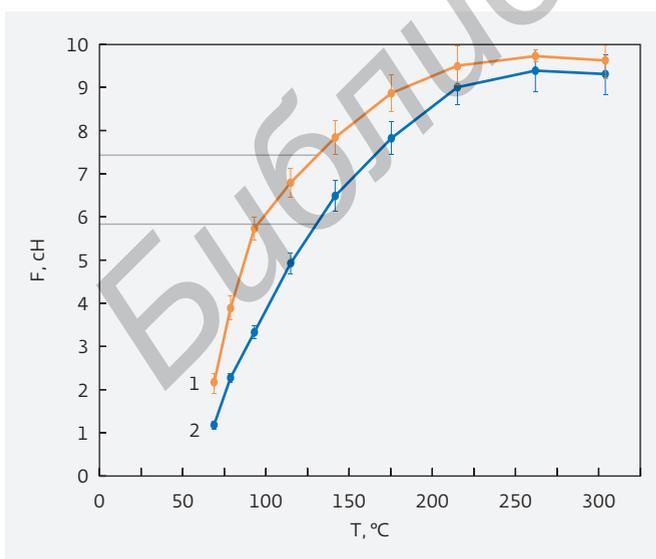


Рис.1. Зависимости прочности соединений от температуры, частоты УЗ-колебаний и времени сварки: 110 кГц, 15 мс (1) и 66 кГц, 20 мс (2)

меньшей его площади. С другой стороны, демонстрируется возможность путем увеличения частоты УЗ-энергии снизить температуру процесса без уменьшения прочности соединения. Это важно не только для упомянутой сборки смарт-карт на основе лавсана, но и в связи с широким использованием припойных паст для посадки кристаллов, когда температура в некоторых случаях ограничена значением не выше 180°C. Кроме того, в эксперименте установлена меньшая критичность к жесткости прижима изделия, что позволяет использовать для фиксации подложки обыкновенные вакуумные столики.

Еще одно исследование было проведено для выявления зависимости прочности на сдвиг от высоты соединения при стандартной и повышенной частоте УЗ-колебаний для проволоки диаметром 17–25 мкм. Интерес к этой зависимости обусловлен тем же очевидным и уже упоминавшимся обстоятельством, что при увеличении высоты соединения его горизонтальная проекция уменьшается, что важно для сварки в условиях плотного монтажа.

Результат этого эксперимента показан на рис.2. Основная пара кривых на графике – зависимость прочности от высоты соединения при стандартной и повышенной частоте УЗ-колебаний. Вторая пара кривых – экспериментально установленная зависимость отношения диаметра шарика к высоте его деформированной зоны ($D_{ш}/H_{ш}$) от высоты $H_{ш}$. Зная значение отношения $D_{ш}/H_{ш}$, можно сделать вывод о высоте соединения на основании оценки его размеров в горизонтальной

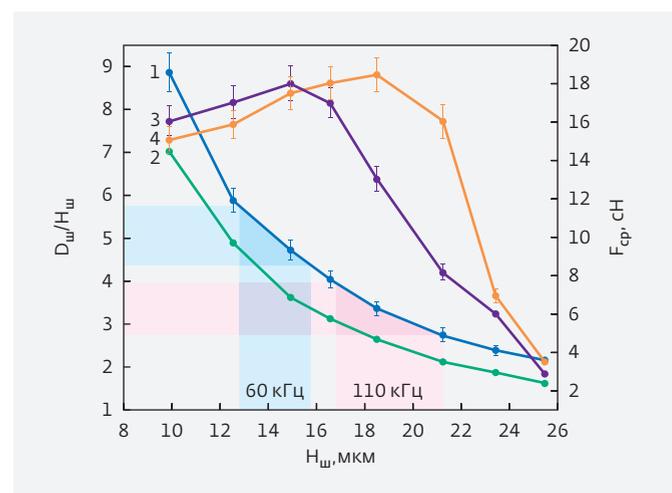


Рис.2. Зависимости отношения диаметра шарика $D_{ш}$ к его высоте $H_{ш}$ (1 – экспериментальные результаты, 2 – расчетная) и усилия на сдвиг F_{cp} . (кривая 3 для 60 кГц, кривая 4 для 110 кГц) от высоты деформированного шарика $H_{ш}$

плоскости, то есть это знание полезно с практической точки зрения.

Выделенные области на оси $H_{ш}$ показывают значения высоты сварного соединения, при которых достигаются максимумы прочности для стандартной (левая область) и повышенной частоты. Выделенные области на оси $D_{ш}/H_{ш}$ соответствуют тем же максимумам, но относительно значений отношения диаметр/высота, что позволяет делать выводы о прочности путем технически несложного измерения диаметра полученного соединения. Рисунок показывает, что бездефектная прочность шарика на сдвиг для проволоки диаметром 17–25 мкм при повышенной частоте УЗ-колебаний 90–120 кГц достигается в диапазоне значений $D_{ш}/H_{ш}$ от 2,8 до 3,9, в то время как для при стандартной частоте – в диапазоне 4,3–5,8. То есть в отношении прочности на сдвиг использование повышенной частоты также способствует получению надежного соединения при уменьшении его площади, что необходимо для сварки в условиях высокой плотности монтажа.

В новом поколении установок микросварки ОАО "Планар" учтены приведенные выше преимущества ТЗС с увеличенной частотой УЗ-излучения. Для этого разработан модельный ряд УЗ преобразователей с повышенной частотой резонанса в диапазоне 95 кГц \pm 5 кГц, осуществляющих микросварку методами "шарик-клин", "клин-клин", и УЗ генератор (УЗГ) с диапазоном частот от 60 до 120 кГц. Управление УЗГ может осуществляться по каналу RS-232 или по 8-битному параллельному порту. Широкий диапазон рабочих частот позволяет использовать УЗГ для модернизации эксплуатируемых установок с УЗ-системой 60 кГц. Результаты настройки УЗГ отображаются на дисплее установки присоединения. Встроенная система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) поддерживает работу УЗГ на резонансной частоте УЗ-преобразователя.

Понимая, что в условиях мелкосерийной сборки целесообразно использование универсального оборудования, позволяющего осуществлять присоединение различными методами и проволоками из различных материалов, разработчики включили в линейку полуавтоматические установки микросварки ЭМ-4320У и ЭМ-4320У-01 [5].

Установка ЭМ-4320У (рис.3) является универсальной, она совмещает три способа сварки: термовзвукосварку методом "шарик-клин", "клин-клин" и контактную сварку. Установка комплектуется тремя быстросменными сварочными головками, обеспечивающие присоединение выводов диаметром 17,5–75 мкм. Программное обеспечение позволяет быстро выбрать соответствующий способ сварки в меню установки. Установка ЭМ-4320У-01 предназначена для



Рис.3. Установка микросварки ЭМ-4320У

термовзвукосварки выводов из золота и алюминия диаметром от 12,5 мкм до 75 мкм методом "клин-клин".

Для решения задачи формирования качественных микросварных соединений установки содержат следующие механизмы и системы:

- прецизионный механизм дозированной бездефектной подачи проволоки с использованием стандартных 2-дюймовых катушек с проволокой фирм SPM (Малайзия) и HERAEUS (Германия);
- прецизионные привода по координатам Z и Y с дискретностью 1 мкм и быстродействующим датчиком касания рабочего инструмента с местом сварки, обеспечивающим минимальную деформацию проводника до начала сварки;
- сварочные головки с программируемым устройством нагружения, обеспечивающие минимальное усилие при касании на сварную точку 5–10 г и необходимый профиль сварочного усилия (постоянный, трапецидальный, ступенчатый) с дискретностью задания нагрузки не более 0,1 г в диапазоне 5–150 г. Головки оснащены программируемым приводом отрыва подачи проволоки, осуществляющим подачу проволоки под инструмент с точностью 3–5 мкм;
- УЗГ с диапазоном частот 60–120 кГц и выходной мощностью 2,5 Вт с дискретностью установки 0,001 Вт для подвода синусоидального сигнала к ультразвуковому преобразователю;
- датчик контроля деформации проводника в процессе сварки и устройство обработки сигнала датчика на основе микроконтроллера, что позволяет по сигналу датчика деформации оптимизировать процесс микросварки.

Для установки ЭМ-4320У-01 разработан механизм зажима проволоки с использованием биморфных пьезопластин фирмы PI (Германия), обеспечивающий



Рис.4.
Автомат прецизионного присоединения проволочных выводов ЭМ-4260



Рис.5.
Автомат присоединения выводов СБИС ультразвуковой сваркой ЭМ-4370

безударный зажим проволоки, что исключает деформацию проволоки диаметром менее 17,5 мкм. Установки содержат два блока управления: справа – со встроенным малогабаритным компьютером и сенсорным 7-дюймовым монитором, а слева – управления приводом и периферийными устройствами. Система управления осуществляет программируемые перемещения сварочной головки по координате Z (по вертикали) и рабочего столика по координате Y (в направлении от оператора), а также управление приводом катушки с проволокой и приводом механизма отрыва-подачи. Все сварочные параметры программируются через дисплей и сохраняются в памяти установки. Может быть индивидуально запрограммирована и сохранена каждая точка сварки стежка и сама форма петли. Таким образом, можно записать программу разварки конкретного прибора под своим именем и сохранить в памяти установки.

В линейку нового поколения входит целый ряд автоматических установок, имеющих ту или иную специализацию. Так, автомат прецизионного присоединения проволочных выводов ЭМ-4260 (рис.4) разработан для автоматического монтажа проволочных выводов из золота к контактным площадкам кристалла и выводам корпусов ИС методом ТЗС и обеспечивает сборку многовыводных изделий с повышенной плотностью монтажа. Первая сварка к кристаллу производится встык оплавленным шариком, вторая – внахлест на контактную площадку корпуса изделия. В автомате реализованы контроль функционирования и диагностика основных систем.

Другой автомат, ЭМ-4370 (рис.5), предназначен для автоматического монтажа методом ультразвуковой сварки "клин-клин" алюминиевых и золотых проволочных выводов большой номенклатуры изделий, требующих большого поля, повышенной точности, в том числе многовыводных СБИС, многокристалльных и многоуровневых электронных модулей.

Одной из опытных работ по ТЗС, проведенных на машинах нового поколения, стал монтаж многокристалльного модуля, собранного в металлокерамическом 40-выводном корпусе (рис. 6), в котором установлены три кристалла ИС, включая конструкцию "кристалл на кристалле" [6]. Сварка проводилась с повышенной частотой ультразвука 104 кГц, переключки изготовлены из золотой проволоки диаметром 25 мкм.

Нижний кристалл конструкции "кристалл на кристалле" содержит контактные площадки с выращенными золотыми контактными выступами (бампами) для обеспечения межкристалльного соединения проволочных выводов без повреждения контактных площадок в месте второй сварки методом "шарик-клин". Микросварка выполнялась при температуре рабочей зоны 145°C. Бампы на контактных площадках кристалла при необходимости могут быть предварительно сформированы путем присоединения к ним оплавленных шариков на конце золотой проволоки.

Подобные конструкции позволяют собрать сложную измерительную систему, включая сенсоры, в одном корпусе или на подложке с минимизацией площади монтажа. Существенным преимуществом при сборке таких приборов методом термозвуковой сварки "шарик-клин" является возможность формирования коротких межкристалльных связей без сложных перемещений капилляра, необходимых при микросварке методом "клин-клин". С другой стороны, при сборке приборов методом "клин-клин" проще обеспечить прямолинейность длинных межсоединений.

Обобщая опыт, полученный в ходе исследований и при разработке нового поколения установок термозвуковой микросварки, можно сформулировать пути решения проблем, возникающих при монтаже устройств с повышенной плотностью соединений, при малом шаге контактных площадок и использовании проволоки малого сечения (≤ 25 мкм):

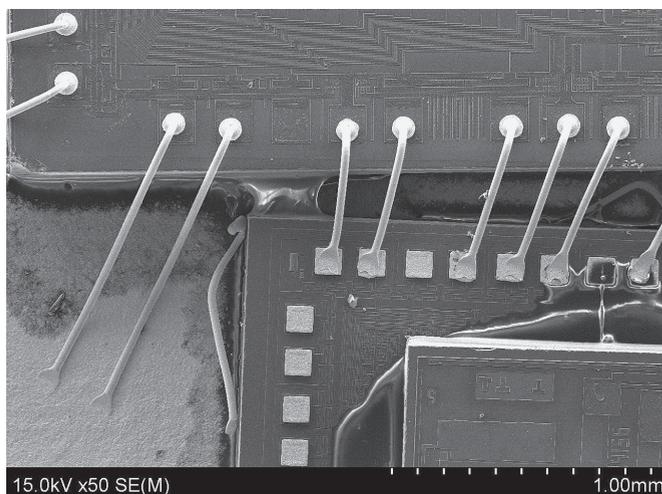


Рис.6. Межсоединения, разваренные методом "шарик-клин" в многокристальном модуле

Сами приборы должны разрабатываться как конструкции с многоуровневым расположением выводов и шахматным расположением контактных площадок на кристалле, обеспечивающие максимальную длину формируемых перемычек не более 4–5 мм. Установки микросварки, используемые для их изготовления, должны предусматривать:

- использование микроинструмента с утонением рабочего торца и оптимальными геометрическими параметрами для конкретного диаметра проволоки;
- применение прецизионных устройств формирования шарика, преимущественно отрицательной полярности, обеспечивающих воспроизводимый диаметр образуемых шариков;
- применение УЗ-генераторов с точной регулируемой энергией и поддержанием УЗ-системы на резонансной частоте для обеспечения минимального

разброса деформации шарика на контактных площадках кристаллов ИС.

Новое поколение установок для микросварки, представленное полуавтоматами типа ЭМ-4320У и автоматами термовзвучковой сварки типа ЭМ-4260, ЭМ-4350, ЭМ-4450, ЭМ-4451 методом "шарик-клин" и ЭМ-4370 методом "клин-клин", по техническим характеристикам не уступает лучшим мировым образцам, позволяет удовлетворить потребности производителей электронной техники и решить проблемы импортозамещения в области сборочного оборудования для микроэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Integrated Interconnect Technologies for 3D Nano Electronics Systems / Ed. by M.S. Bakir, J.D. Meindl. – London: Artech House, 2009. – 528 p.
2. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро – и нанoeлектроники / Под ред. А.П. Достанко и А.М. Русецкого. – Минск: Бестпринт, 2011. – 216 с.
3. **Harmann G.G.** Wire bonding in microelectronics. – N.Y.: McGraw Hill, 2010. – 426 p.
4. **Yao Y.F., Xiong Z.P., Gu X., Chua K.H.** Assembly process development of 50 μm fine pitch wire bonded devices // Electronic Components and Technology Conference 2004. – P. 365–371.
5. Новое поколение установок ультразвуковой микросварки / Г.Ф. Ковальчук, И.Б. Петухов, В.Л. Ланин и др. // Технологии в электронной промышленности. –2011. –№ 8. – С. 36–40.
6. **Ланин В.Л., Петухов И.Б.** Получение соединений повышенной плотности в 3D интегральных микросхемах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –2014. –№ 2–3. – С. 48–53.