

УДК 621.791.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНОГО МОНТАЖА В МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЯХ



И.Б. Петухов

Начальник научно-технического центра
ОАО «Планар-СО»,
кандидат технических наук,
petuchov@kbtem.by



В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и
технологии БГУИР,
доктор технических наук
vlanin@bsuir.by

И.Б. Петухов

Окончил Белорусский государственный университет по специальности радиофизика. Область научных интересов связана с исследованием проблем сборки изделий электронной техники. Начальник научно-технического центра ОАО «Планар-СО». Автор 4-х монографий, имеет 40 летний опыт работы в области сборки изделий электронной техники.

В.Л. Ланин

Окончил Минский радиотехнический институт. Профессор кафедры электронной техники и технологии. Автор 10 монографий, имеет 40 летний опыт работы в области технологии сборки и монтажа электронной техники.

Аннотация. Выполнен анализ факторов, определяющих стабильность термозвуковой микросварки золотой проволоки диаметром 17,5-50 мкм при сборке многокристалльных модулей. Определены зависимости влияния конфигурации сварочного капилляра на вид соединения и анализ алгоритма формообразования межсоединения.

Ключевые слова: проволочный микромонтаж, многокристалльные модули, ультразвуковая / термозвуковая микросварка, ультразвуковой преобразователь, сварочный капилляр.

Введение. Прогрессирующая миниатюризация многокристалльных модулей (МКМ) с обеспечением высокой функциональности вызвана, как техническими, так и экономическими соображениями. Очевидно, что набор определенных кристаллов, установленных на объединительной подложке (интерпозер) позволяет создать необходимый функционал в сжатые сроки даже без использования фотолитографии (рисунок 1). Топология интерпозера может быть выполнена установками лазерной обработки материалов с использованием режима лазерного выпаривания предварительно нанесенной металлизации с шириной линии снятия металлизации 15-20 мкм на кремниевой или керамической подложке.

Для обеспечения межсоединений кристалл–интерпозер–кристалл используется проволочный монтаж, который остается одним из основных методов сборки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИС), что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическими размерами изделий, а также более доступным технологическим процессом [1].

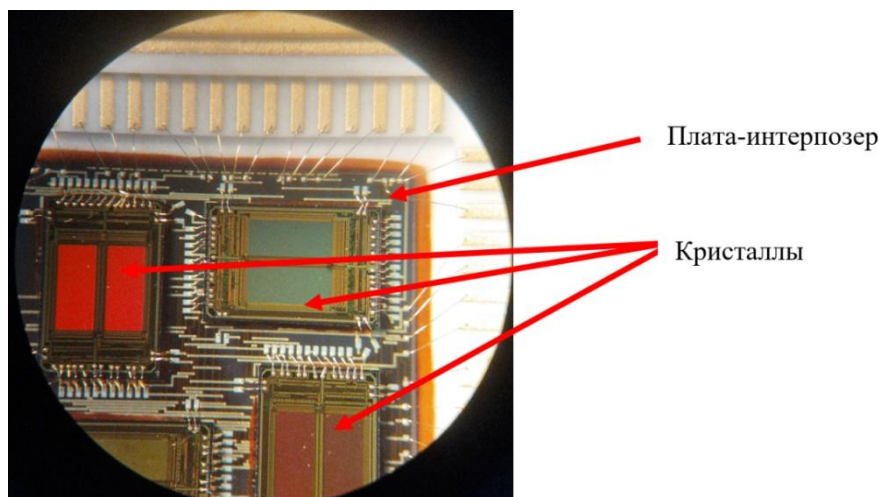
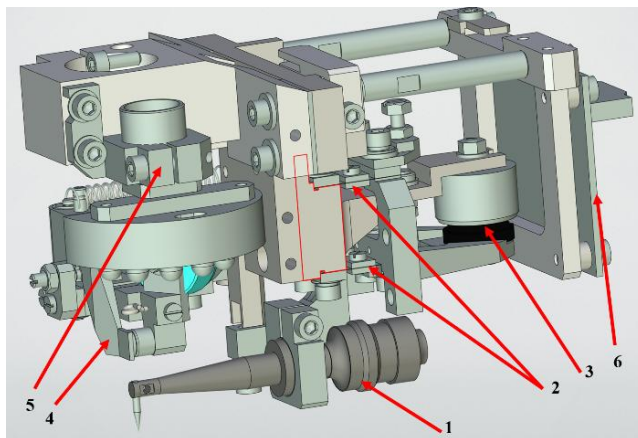


Рисунок 1. Фрагмент многокристальной сборки с использованием объединительной платы- интерпозера

В настоящее время монтаж золотых проволочных выводов диаметром от 17,5 до 50 мкм в основном осуществляется с помощью термозвуковой микросварки методами «клин-клин» и «шарик-клин» с подогревом рабочей зоны от 100 до 230 С, приложением заданного усилия к формируемому соединению проволока - контактная площадка и одновременным вводом ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой в диапазоне 60-140 кГц через рабочий инструмент [2]. При монтаже золотой проволокой также используются методы термокомпрессионной (с температурой рабочей зоны в диапазоне 270-310 С) сварки и расщепленным электродом без воздействия УЗ колебаний при сборке структур, чувствительных к механическим вибрациям и появлению микротрещин в зоне образования соединения. На сегодняшний день практически на промышленном уровне освоена технология присоединения медной проволоки диаметром от 17,5 до 50 мкм методом термозвуковой сварки, но с необходимостью поддува защитного газа (95%N₂ 5%H₂) при формировании шарика на конце проволоки и в зоне соединения для защиты от окисления соединяемых материалов [3,4]. Существенным недостатком медной проволоки в данном случае является ее быстрая окисляемость, для предотвращения которой необходимо использование специальной тары хранения в азотной среде, а также короткие сроки использования проволоки. Для клиновой сварки широко используется алюминиевая проволока, которая также быстро окисляется, но свойства окислов алюминиевой проволоки и медной существенно различаются. Оксиды алюминия твердые и хрупкие и легко растрескиваются под действием ультразвуковых колебаний, в отличие от окислов на медной проволоке, которые мягкие и не разрушаются под действием ультразвука. Частным решением защиты медной проволоки является покрытие ее поверхности тонкой палладиевой пленкой.

Процесс термозвуковой микросварки золотой проволоки методом «шарик-клин» в технологическом плане обусловлен следующими параметрами: режимом формирования шарика на конце золотой проволоки, температурой рабочей зоны монтажа, амплитудой УЗ колебаний микросварочного инструмента (капилляра), контактным усилием (нагрузением) системы «торец капилляра – проволока - контактная площадка» и временем сварки. Очевидно, что чем тоньше используемая проволока, тем точнее должны задаваться исходные параметры и поддерживаться заданными в процессе присоединения. Применение тонкой проволоки < 20 мкм связано в первую очередь с размерами контактных площадок кристаллов < 60×60 мкм, а значит, и малой площадью соединения. Анализ технических характеристик установок шарикового и клинового присоединения

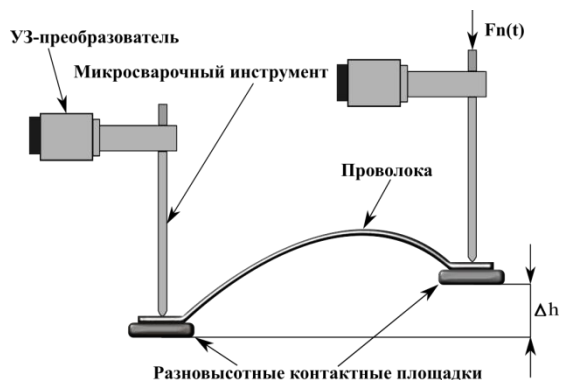
выводов ведущих мировых производителей, таких, как *Hesse & Knipps* [5], *Kulicke & Soffa* [6], *F&K Delvotec* [7] и *ASM* [8], показывает, что особое внимание при этом уделяется определению момента контактирования с точкой присоединения проволоки и управлению нагружением. Для 2,5D МКМ с заложенной в конструкцию прибора высокой разновысотностью Δh (до 4 мм) уровней сварки необходимо обеспечивать вертикальное положение микросварочного инструмента на позиции присоединения. Это может быть обеспечено перемещением сварочной головки (рисунок 2) по вертикальной оси Z.



1 – УЗ преобразователь; 2 – плоскопараллельная подвеска; 3- катушка нагружения, 4- механизм зажима проволоки, 5- держатель оптической системы, 6-кроссовое устройство

Рисунок 2. Сварочная головка для термозвуковой сварки золотой проволокой

Усилие $F_N(t)$ (рисунок 3) на микросварочный капилляр создается в большинстве случаев от электромагнитного актуатора - катушки в поле постоянного магнита по типу звуковой катушки (*voice coil motor*), ввиду простоты конструкции и возможности программирования посредством задания тока через катушку. Преимуществом подвески УЗ преобразователя на плоскопараллельных пластинах в сварочной головке является отсутствие трения качения и повышенная износостойкость по сравнению с узлами, выполненными на подшипниковых опорах, что делает их вариантом, привлекательным для применения в системах УЗ микросварки. Однако у подвески на плоскопараллельных пластинах есть и недостаток: зависимость усилия в зоне сварки от величины перебега сварочной головки (СВГ) после момента контактирования торца капилляра с точкой сварки. Перебег гарантирует необходимую степень деформирования проволоки для образования надежного соединения в процессе сварки и обычно его величина устанавливается равной диаметру проволоки. Фактически к предустановленному сварочному усилию прикладывается упругая сила изгиба плоскопараллельных пластин [9] и необходимо принимать меры по компенсации этого недостатка с помощью схемотехнических решений системы управления нагружением.



Δh - разновысотность контактных площадок

Рисунок 3. Положение УЗ преобразователя в сварочной головке на позиции присоединения

Микросварочный капилляр (инструмент) (рисунок 4) играет ключевую роль в термозвуковом присоединении золотой проволоки. Он обеспечивает точную и надежную сварку проволоки с контактными площадками прибора. Капилляр представляет собой иглу (рис.4б) со сквозным отверстием из керамики Al_2O_3 диаметром 1,59 мм и длиной L из ряда 9,5; 11,1; 12; 16 и 19 мм. Длина выбирается из необходимой глубины проникновения в изделие, например, если контактные площадки находятся в глубоком колодце. Стандартными считаются капилляры длиной 9,5 и 11,1 мм. Рабочий торец капилляра (рис.4а) определяет форму и размер сварного соединения типа «шарик» и «клин» и выбирается строго под заданный диаметр присоединяемой проволоки. Внешний угол рабочего торца FA для стандартных задач выбирается 4 или 8 градусов, угол внутренней фаски ICA 90 или 120 градусов.

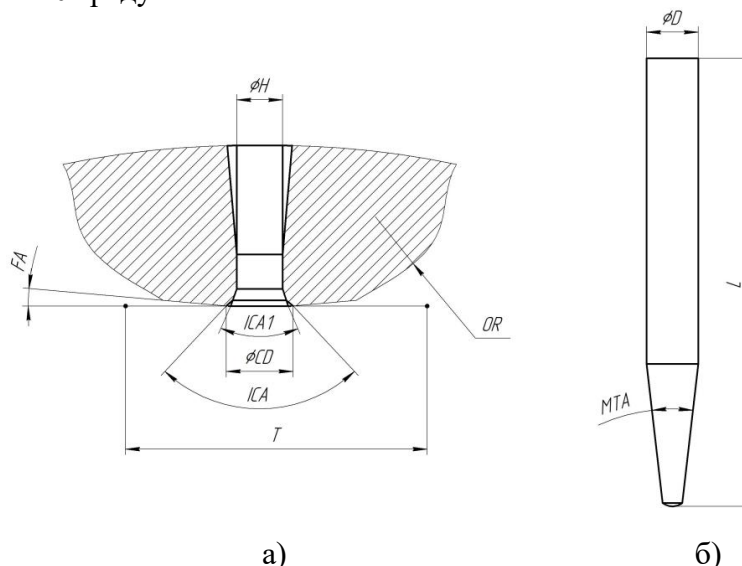


Рисунок 4. Рабочий торец микросварочного капилляра (а) и его общий вид (б)

Полученные экспериментальные данные для золотой проволоки диаметром 25 мкм отношения диаметра получаемых соединений к величине деформации шарика на контактной площадке показаны на рисунке 5.

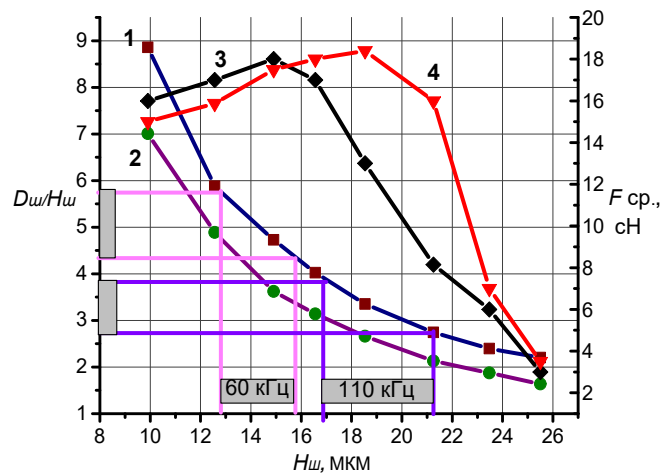


Рисунок 5.– Зависимости отношения диаметра деформированного шарика к его высоте (кривые 1 и 2) и величины прочности на сдвиг при ультразвуковых колебаниях 60 кГц (кривая 3) и 110 кГц (кривая 4) для проволоки диаметром 25 мкм

Для нестандартных задач, таких как, присоединение золотой, медной и алюминиевой проволоки методом «клин-клин» с использованием сварочной головки на рисунке 2, необходимо использовать угол рабочего торца FA 0 градусов, т.е. плоский торец, для обеспечения необходимой прочности и внешнего вида соединения. В этом случае (при монтаже проволоки по методу «клин-клин») режим формирования шарика на конце проволоки деактивируется и вместо этого формируется после второго соединения подогнутый под рабочий торец капилляра кончик проволоки, так называемый «хвостик», программируемой длины. Алгоритмы отрыва проволоки от места второй сварки (после формирования петли) и подгибки «хвостика» под торец могут быть разными, но важным моментом здесь является направление подгибки «хвостика», который всегда должен быть соосным с монтируемой петлей (проволочным стежком). Возможным и очевидным решением может быть введение возможности вращения сварочной головки вокруг своей оси.

Экспериментально установлено воздействие амплитуды ультразвуковых колебаний рабочего торца микросварочного капилляра на прямолинейность образуемых межсоединений, особенно при положении проволоки перпендикулярно направлению продольных ультразвуковых колебаний вдоль оси Y на рисунке 6. Поворот сварочной головки может значительно снизить этот эффект за счет поворота волновода УЗП вдоль оси образуемого соединения. Еще одним решением является использование двухуровневого ультразвукового импульса на второй точке присоединения вывода (рисунок 7). При этом длительность первого уровня T_1 составляет 10-15% от общей длительности T_2 , а амплитуда A_1 рассчитывается из следующего соотношения:

$$A_1 = A_2 \times \left(1 - \left| \frac{\cos \theta}{2} \right| \right) \quad (1)$$

где A_1 – амплитуда первого уровня ультразвукового импульса, A_2 – амплитуда второго уровня, θ – угол между направлением вывода и осью X (рисунок 6). Из соотношения (1) видно, что минимальная амплитуда A_1 достигается при $\theta = 0$, т.е. при перпендикулярном

направлении ультразвуковых колебаний относительно направления вывода, что снижает воздействие ультразвука на прямолинейность формируемого проволочного вывода.

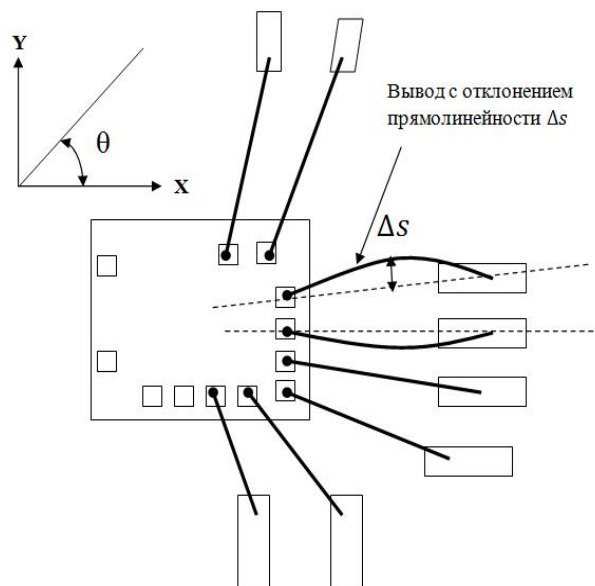


Рисунок 6. Отклонение вывода от прямолинейности на величину Δs при воздействии ультразвуковых колебаний торца капилляра вдоль оси Y

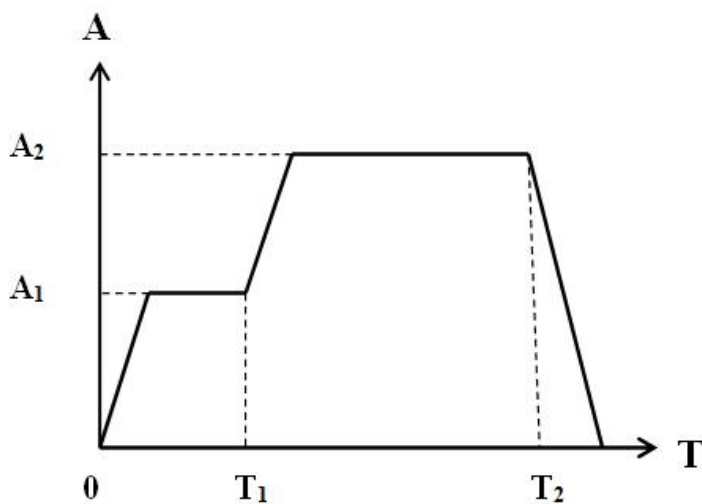


Рисунок 7. Профиль 2-х уровневый ультразвукового импульса на второй точке проволочного вывода, A - амплитуда УЗ колебаний; T - длительность

Выбор необходимого капилляра производится из каталога производителя, например, таких как *SPT* [10], *MicroPoint* [11], *GaiserTool* [12], которые являются лидерами в производстве микросварочных капилляров, инструментов монтажа кристаллов, расходных материалов и дополнительной оснастки. При выборе капилляра, особенно по его длине, надо иметь ввиду следующее. Капилляр зажимается в торец волновода УЗ преобразователя (УЗП) и необходимо быть уверенным после его установки в правильном согласовании с УЗП, поскольку капилляр является в данном случае нагрузкой УЗП.

Для оценки согласования системы УЗП – микросварочный капилляр на резонансной частоте придерживаются следующей методики. С помощью векторного анализатора импеданса снимают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ультразвукового

преобразователя с поведением импеданса в районе резонансной частоты. Затем снимают АЧХ с зажатым капилляром в волноводе и добиваются минимального расхождения импеданса и резонансной частоты УЗП без капилляра и с установленным капилляром. Возможно при этом придется выбрать положение капилляра в волноводе (выше или ниже), так называемый вылет. Данную операцию рекомендуется выполнять с капиллярами других производителей, а также при проблемах стабильности сварочного процесса. Данная процедура не требует разборки сварочной головки и проводится достаточно оперативно. Типовые характеристики УЗП установки ЭМ-4520 в исполнении для термозвуковой сварки производства ОАО «Планар-СО» без инструмента и с установленным инструментом показаны на рисунке 8. Используемый капилляр имеет длину 11,1 мм, верхняя часть которого установлена заподлицо с волноводом. Из рисунка 6 видно, что изменение параметров ультразвукового преобразователя незначительное как по резонансной частоте ($F_s \sim 97,8$ кГц), импедансу ($R_l \sim 9$ Ом) и добротности ($Q_m \sim 430$), что говорит о хорошем согласовании системы ультразвуковой преобразователь-капилляр. Из практического опыта, существенными изменениями можно считать изменение частоты на 2 и более кГц, импеданса в 1,5 и более раз.

На приведенных диаграммах могут быть замечены побочные резонансы (в случае их наличия), которые могут создавать проблемы стабильной работе сварочной системе. Таким образом, данная процедура является оперативной диагностикой сварочной системы.

Формирование межсоединений в многокристалльных приборах достаточно сложная задача ввиду большого числа выводов и соответственно малым шагом между ними, значительной разновысотностью, соединениями различной длины и высоты.

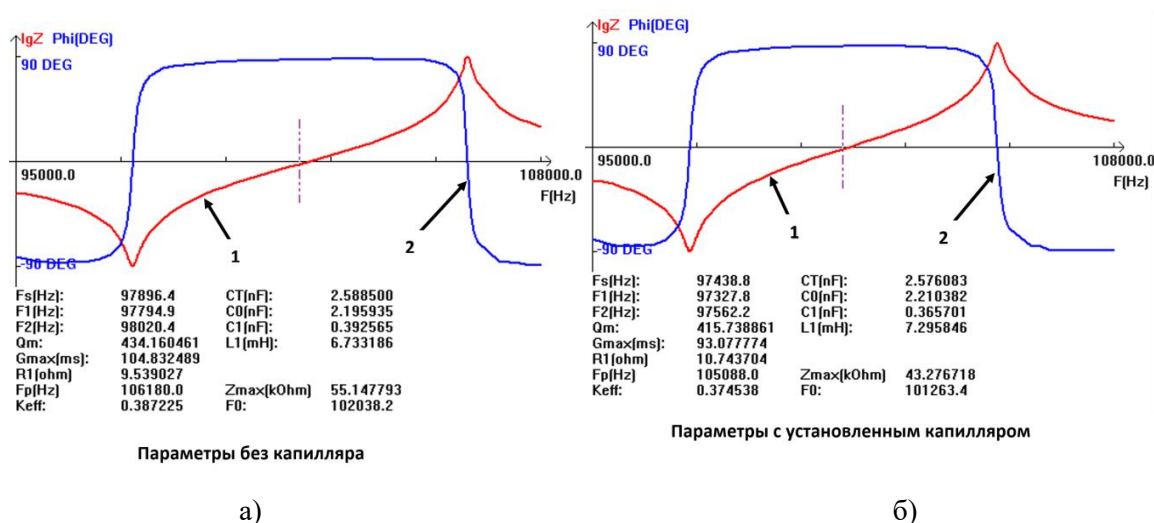


Рисунок 8. Параметры УЗ преобразователя без капилляра(а) и с установленным капилляром(б); 1-кривая импеданса; 2- кривая фазового сдвига между током и напряжением УЗП

Последовательность образования соединения контактной площадки кристалла и контактной площадки подложки изображена на рисунке 9. Из рисунка 9 видно, что для получения соединения необходимой формы капилляр совершает сложное интерполированное перемещение. На приведенном рисунке представлено последовательное перемещение капилляра для образования стандартного межсоединения треугольной формы. Катетами этой треугольной формы являются $(h+l_2)$ и l_1 . Начальное движение капилляра от первой точки соединения шариком встык производится в точку 1 и затем производится реверсивное движение в точку 2. Угол и высота перехода в точку 2

могут корректироваться в зависимости от физических параметров используемой проволоки.

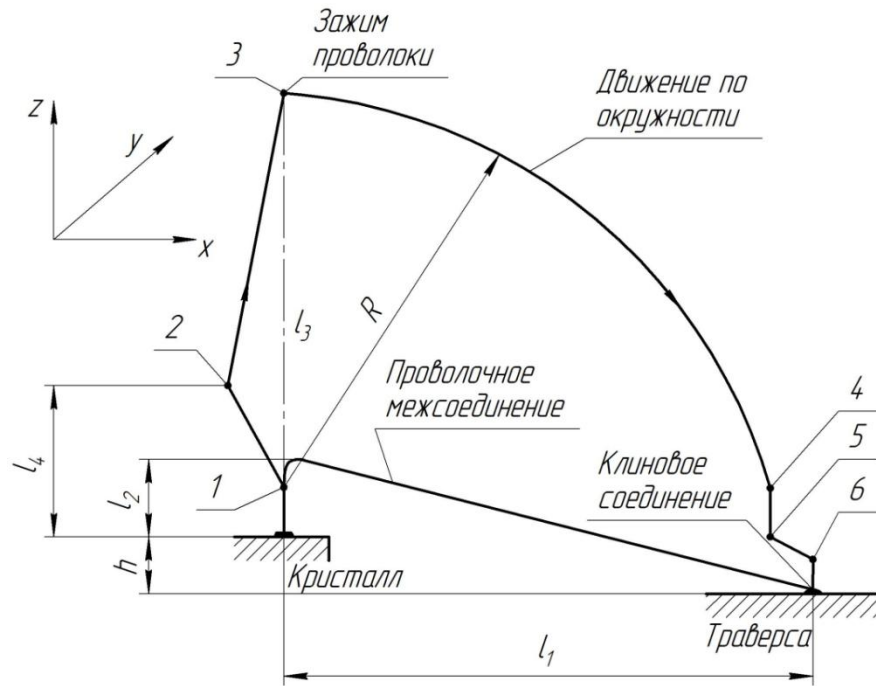


Рисунок 9. Последовательность перемещения капилляра при формировании проволочного соединения, где l_1 – длина межсоединения; l_2 – высота межсоединения; l_3 – высота от первой точки соединения до верхней точки подъема капилляра; l_4 – высота точки обратного реверса; R – радиус движения по окружности

Из точки 2 производится перемещение капилляра в точку 3 – верхнюю точку межсоединения. Здесь происходит по команде от управляющей системы зажим проволоки и перемещение по круговой траектории из точки 3 в точку 4. Далее следует вертикальное программируемое перемещение из точки 4 в точку 5. Заметим, что траектория 4-5 отстоит на некотором расстоянии от точки 6 – над местом присоединения второй точки сварки. Перемещением из точки 5 в точку 6 производится подтяжка петли для обеспечения ее прямолинейности. Очевидно, что все участки траектории должны быть рассчитаны с высокой точностью, а привод соответственно должен отработать эти перемещения, причем с высокой скоростью. Современные установки такое перемещение осуществляют за время 70-100 мс. Критичным параметром формирования межсоединения на рисунке 9 является верхняя точка подъема 3. Подъем капилляра ниже этой точки приводит к обрыву межсоединения, а выше – к искривлению формы. Из геометрии перемещения капилляра на рисунке 9 нетрудно определить, что высота подъема от места присоединения на кристалле в точку 3 определяется следующим образом:

$$l_3 = l_2 + (l_1 \times k) + \sqrt{(l_1^2 + (l_2 + h)^2)}, \quad (2)$$

где k – коэффициент в диапазоне 0...0,3.

Рассчитаем, например, высоту подъема l_3 (мм) для $l_2 = 0,3$ мм, $k=0$, $l_1 = 5$ мм и $h = 0,4$ мм. Подставляя значения в (2), получаем, что для длины межсоединения $l_1 = 5$ мм, высота подъема l_3 должна быть 5,35 мм. Коэффициент k вводится для корректировки формы петли для конкретного типа проволоки. Зависимости высоты подъема l_3 от длины межсоединения l_1 и разницы высот h уровней присоединения показаны на рисунке 10.

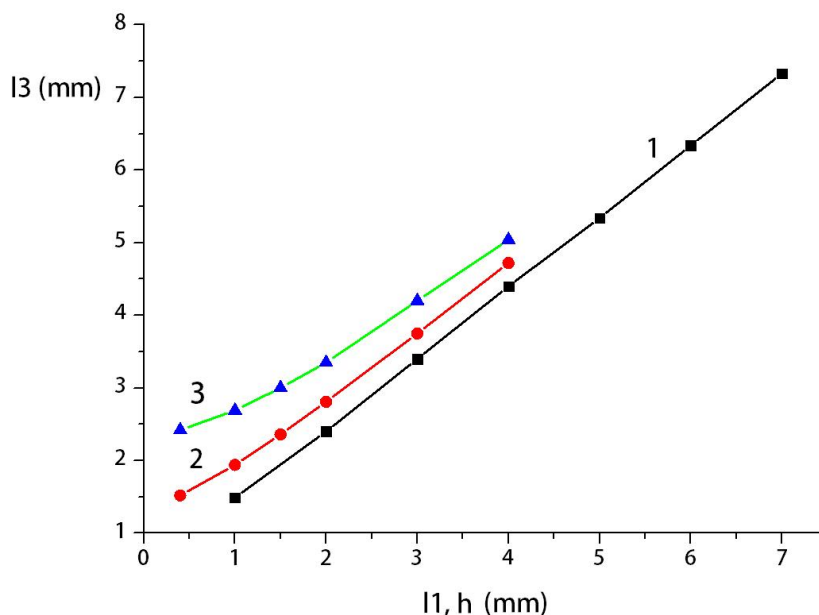


Рисунок 10. Зависимость высоты подъема l_3 от длины межсоединения l_1 (кривая 1), от разницы высот h для длины межсоединения 1 мм (кривая 2), от разницы высот h для длины межсоединения 2 мм (кривая 3)

Из рисунка 10 и формулы (2) легко определить исходные параметры перемещения сварочного капилляра, в частности высоты подъема для исключения обрыва проводника.

Выводы

1 Геометрия рабочего торца сварочного капилляра имеет ключевое значение при сборке многокристальных модулей. При использовании/замене капилляров от различных производителей рекомендуется проводить предварительное тестирование согласования с ультразвуковым преобразователем сварочной головки с использованием векторного анализатора, добиваясь минимального расхождения значений резонансной частоты и импеданса ультразвукового преобразователя с установленным капилляром и без него

2 Экспериментально установлено, что на прямолинейность образуемых межсоединений влияет направление ультразвуковых колебаний относительно оси проволоки, что требует корректировки амплитуды ультразвуковых колебаний сварочного капилляра за счет использования двухуровневого ультразвукового импульса на второй точке присоединения вывода, при этом длительность первого уровня составляет 10-15% от общей длительности, а амплитуда рассчитывается из следующего соотношения:

$$A_1 = A_2 \times \left(1 - \left|\frac{\cos \theta}{2}\right|\right),$$

где A_1 – амплитуда первого уровня ультразвукового импульса, A_2 – амплитуда второго уровня, θ – угол между направлением вывода и осью X.

Список литературы

- [1] Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А.П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2009. –202 с.
- [2] Harmann, G.G. Wire bonding in microelectronics / G.G. Harman . Third Edition– N.Y. : McGraw Hill, 2010.– 427 p.
- [3] Cu wire and Pd-Cu wire package reliability and molding compounds / H. Abe [and etc.] // Proceeding 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, IEEE, San Diego, CA. – pp. 1117-1123.
- [4] Fine pitch copper wire bonding in high volume production / В.К. Appelt [and etc.] // Microelectronics Reliability, Vol. 51 No. 1, 2011. - pp. 13-20.
- [5] Ultrasonic Wire Bonder for all wire sizes and applications! [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hesse-mechatronics.com/en/>
- [6] Innovative industry-leading ball bonding solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kns.com/Products/Equipment/Ball-Bonder>
- [7] Range of products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fkdelvotec.com/en/medien/downloads/>
- [8] We are ASMPT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asmpacific.com/en/products?equipment=4>
- [9] Петухов, И.Б. Стабилизация сварочного усилия в процессе ультразвукового монтажа проволочных и ленточных выводов / И.Б. Петухов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре, 2021. – №1–2. –С. 49–53.
- [10] Semiconductor Tools – High Performance Ceramics HPC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.smallprecisiontools.com/en/homepage/?oid=55&lang=en>
- [11] Who we are [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mpptools.com/>
- [12] Gaiser catalog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.net/doc/25240729/gaiser-catalog>

Авторский вклад

Петухов Игорь Борисович – проведение экспериментальных работ, оптимизация алгоритмов формирования межсоединений при сборке многокристальных модулей.

Ланин Владимир Леонидович – постановка задачи исследования, анализ полученных результатов.

MODELLING WIRE BONDING IN MULTICHIP MODULES

I.B. Petuhov

Chief, R&D Centre of assembly equipment OJSC “Planar-SO”, PhD of Technical Sciences, Minsk Republic of Belarus, E-mail: petuchov@kbtem.by

V.L. Lanin

Professor, Department of Computer Design of BSUIR, Doctor of Technical Sciences

Abstract. The analysis of factors that determine the stability of thermosonic gold wire bonding with a diameter of 17.5-50 microns during the assembly of multichip modules was performed. Dependencies of the configuration of the bonding capillary on wire bonds and analysis of the algorithm of the loop formation are determined.

Key words: Wire bonding, multichip modules, ultrasonic / thermosonic bonding, ultrasonic transducer, bonding capillary.