

## **МОНТАЖ ЛЕНТОЧНЫМИ ПЕРЕМЫЧКАМИ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

**Владимир Ланин**

[vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)

**Сергей Волкенштейн**

[wolkenstein@kbtcm.by](mailto:wolkenstein@kbtcm.by)

**Игорь Петухов**

**Александр Хмыль**

Для монтажа мощных полупроводниковых приборов в корпусе ТО–220 алюминиевыми перемычками разработано специальное технологическое оборудование и инструмент ультразвуковой микросварки. Методом лазерной фотоакустической диагностики определены типичные дефекты соединений ленточными перемычками.

### **Факторы прочности микросварных соединений при монтаже полупроводниковых приборов**

Внедрение энергосберегающих технологий неразрывно связано с достижениями в области силовой электроники. При монтаже мощных полупроводниковых приборов, таких как MOSFET и IGBT, одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса является соединение с помощью проволочных выводов увеличенных размеров и ленточных перемычек. Этот вид монтажа остается одним из основных при сборке полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС), что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическим размерам изделий [1].

Основным недостатком этого метода является то, что проволочные перемычки очень часто являются причиной отказов приборов. Вывод часто разрушается у основания, где под действием сварочной головки происходит упрочнение проволочки наклепом, сопровождаемое образованием микротрещин. Если такое соединение подвергается воздействию механических напряжений, связанных с термическим изменением размеров, механическим ударом или расширением герметизирующей пластмассы, то разрушение его является наиболее вероятным [2].

При сборке приборов проволочные соединения выполняются после того, как кристаллы ИМС отсортированы из разделенной пластины и смонтированы в корпус. Монтаж может быть выполнен алюминиевой, медной или золотой проволокой термокомпрессионной, ультразвуковой или термозвуковой микросваркой.

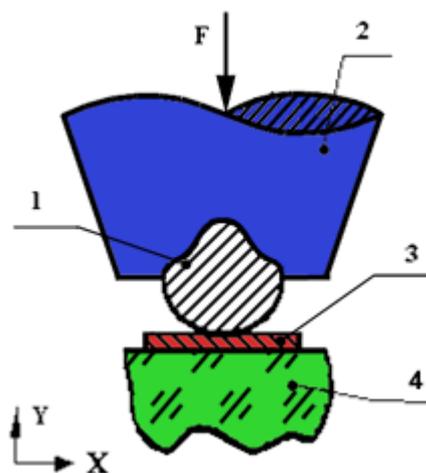
Все большую популярность у изготовителей изделий твердотельной электроники получает способ термозвуковая сварка (ТЗС), при которой соединение того же типа, что и применяемое при сборке термокомпрессионной сваркой, формируется в результате совместного действия температуры, ультразвука и давления инструмента.

Воспроизводимость качества соединений достигается при существенном уменьшении воздействующих факторов режима сварки, как правило, температуры [3].

К ТЗС обращаются при автоматизированной сборке приборов, критичных к температурам свыше  $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . В частности, такими являются быстродействующие приборы на арсениде галлия, некоторые заказные БИС и СБИС. С успехом этот способ сварки применяется при сборке гибридных ИМС с толстопленочной металлизацией. Установлено, например, что качественные, устойчивые к повышенным температурам ( $150^{\circ}\text{C}$ ; 3000 ч.) и термоциклированию (100 циклов;  $-55\text{...}+150^{\circ}\text{C}$ ) соединения золотой микропроволокой получаются способом ТЗС при температуре подложки  $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$  [4].

При УЗ микросварке алюминиевой проволоки после ее прижима инструментом к контактной площадке и ввода УЗ колебаний, передаваемых на инструмент от преобразователя, вибрация инструмента вызывает скачок уплотнения на контактной площадке (рис. 1). Длительность присоединения менее 1 с. Диапазон частот УЗ колебаний генератора 20-66 кГц. Основные преимущества УЗС: сварка широкого круга металлов с резко различающимися физико-механическими свойствами; деформация проводника в месте сварки уменьшается в 1,5 раза и более по сравнению с другими видами сварки давлением, чем обеспечивается большая прочность.

Во время движения волнового фронта УЗ энергия поглощается проволокой, последняя размягчается и под действием нагрузки течет, разрывая поверхностный окисел и оставляя незащищенные чистые поверхности проволоки и контактной площадки, которые быстро свариваются. Соединение образуется в тороидальной области вокруг центра контактной площадки и проволоки внутри области волнистой структуры. Поскольку проволока размягчается и деформируется, вертикальное напряжение уменьшается во времени. В то же время вибрирующее воздействие инструмента для УЗ сварки вызывает появление горизонтального напряжения. При большой величине вертикального напряжения соединения произойти не может, так как сдержано боковое движение. При среднем вертикальном напряжении происходит соединение, и свариваемая область растет со временем, так как вертикальное напряжение уменьшается.



**Рис. 1.** Схема УЗ сварки: 1–проволока; 2–сварочный инструмент; 3–контактная площадка; 4–кристалл

Образование сварного соединения определяется, с одной стороны, колебательной скоростью, силой сварочного наконечника и временем сварки. С другой стороны, механизм сварки определяется свойствами свариваемых металлов и поверхностных пленок. Ввод энергии ультразвука в сопряженные на малом участке металлы вызывает повышение температуры в зоне их контакта, растрескивание твердых и выгорание жировых пленок, пластическое деформирование материала, интенсивную диффузию, рекристаллизацию, плавление и другие явления.

Наиболее существенным условием свариваемости металлов в твердом состоянии является разница в атомных диаметрах свариваемых металлов, которая не должна превышать 15-18 %. При различии диаметров от 19 до 44 % схватывания металлов не происходит [5]. Предельная величина относительной разности диаметров совпадает с общим условием существования твердых растворов металлов, что дает возможность установить свариваемость из фазовой диаграммы для данной пары металлов. Металлы свариваются в случае полной или ограниченной растворимости в твердом состоянии. Сварка возможна и при отсутствии растворимости, если удастся подобрать третий растворяющийся металл, который наносится на один из свариваемых металлов. В общем случае ровные и чистые (тщательно обработанные) контактные поверхности свариваются лучше. И, наоборот, грубая механическая обработка свариваемых поверхностей, наличие различных поверхностных пленок, плакирование, как правило, ухудшают свариваемость металлов, а в ряде случаев и исключают её. Благоприятными условиями для схватывания является совпадение зерен с близкой кристаллографической ориентацией.

Важной задачей в совершенствовании технологии УЗ сварки является изыскание параметров, позволяющих контролировать качество соединений в процессе сварки. Решение этого вопроса дало бы возможность одновременно с автоматизацией значительно повысить воспроизводимость результатов сварки, а также оценить прочность соединений без их разрушения.

### **Выбор технологических режимов сварки, инструмента и оборудования**

При сборке мощных полупроводниковых приборов в корпусах ТО-220, ТО-218 применяют алюминиевую проволоку больших диаметров (от 100 до 500 мкм), а также ленточные переемы, обеспечивающие протекание большой плотности тока (рис.2).



**Рис.2.** Соединения в силовых приборах с помощью ленточных переемычек

Процесс УЗ сварки в технологическом плане обусловлен следующими параметрами: мощностью колебательной системы, контактным давлением, амплитудой колебаний сварочного наконечника и временем сварки. Он сопровождается увеличением температуры в зоне сварки до  $190^{\circ}\text{C}$  при усилии сжатия до 2–2,5 Н. Это подтверждает предположение о том, что источником тепла при УЗС является трение между свариваемыми металлами при их относительном перемещении.

Электрическая мощность, передаваемая от генератора к преобразователю, определяет амплитуду механических колебаний инструмента и величину сдвиговых напряжений в зоне сварки, под действием которых преодолевается сила трения, вызванная сжатием соединяемых элементов [6]. Мощность, выделяемая в зоне контакта при УЗС равна:

$$P = 0,5(\omega A)^2 R_H, \quad (1)$$

где  $\omega$  - круговая частота;  $A$  - амплитуда смещения торца сварочного инструмента;  $R_H$  - приведенное активное механическое сопротивление нагрузки, равное:

$$R_H = 0,64M_{\text{тр}} F / A, \quad (2)$$

где  $M_{\text{тр}}$  - коэффициент трения;  $F$  - усилие сжатия соединяемых элементов. После преобразования выражения (1) с учетом (2) получим:

$$P = 0,318\omega^2 A M_{\text{тр}} F. \quad (3)$$

При малых значениях амплитуды колебаний сварное соединение не образуется, поскольку сдвиговых напряжений не хватает для разрушения окисных пленок в зоне контакта, а при больших - в свариваемых элементах возникают усталостные процессы, приводящие к разрушению соединения. Оптимальные значения амплитуды колебаний инструмента составляют 1,5–2,0 мкм, однако непрерывный контроль таких колебаний затруднен.

При малых перемещениях инструмента и времени сварки передача УЗ колебаний в зону монтажа недостаточно эффективна, при больших значениях амплитуды колебаний снижается сила сцепления двух металлов вследствие эффекта скольжения. При большом времени сварки происходит разрыв проволочного проводника по “шейке” из-за его чрезмерной деформации. При исследовании зон схватывания под микроскопом установлено, что глубина объемного взаимодействия свариваемых металлов возрастает с увеличением времени микросварки до 0,8 с. Однако при длительном времени сварки прочность соединений снижается вследствие появления трещин в зоне микросварки.

Выбор частоты УЗ колебаний для микросварки основан на необходимости ограничения амплитуды колебаний, что уменьшает знакопеременные напряжения в соединяемых деталях и опасность разрушения соединений.

Минимальный диаметр проводника  $d_{\text{min}}$  ограничен максимальным постоянным током  $I$  через него [7]:

$$d_{\text{min}} = \sqrt[3]{(I / K)^2}, \quad (4)$$

где  $K$  – постоянная материала провода, для алюминия – 119, золота – 160.

Основное влияние на механическую прочность сварных соединений оказывают мощность колебательной системы, амплитуда смещений инструмента, усилие сжатия и время сварки [8]. Влияние амплитуды на сварку необходимо рассматривать только с учетом мощности системы, а не её конструктивного исполнения, когда за счет изменения коэффициента усиления концентратора можно изменить амплитуду смещений инструмента. Между мощностью и амплитудой колебаний инструмента имеет место линейная зависимость. Но помимо мощности, она зависит от усилия сжатия свариваемых изделий и времени сварки, которые в свою очередь зависят от неё. Амплитуда колебаний сварочного инструмента должна быть такой, при которой могли бы возникнуть относительные перемещения в контакте между деталями.

Особенностью амплитуды колебаний инструмента является её зависимость от внешней нагрузки, которая изменяется как в течение цикла сварки, так и при переходе от сварки к сварке. Изменение внешней нагрузки выражается в изменении амплитуды колебаний инструмента в процессе сварки. На основании этого сделан вывод о том, что изменение амплитуды колебаний в процессе сварки связано с прочностью сварного соединения. Это дает возможность управлять качеством соединений в процессе сварки с помощью мониторинга амплитуды колебаний.

Для УЗ микросварки ленточных выводов фирмой Ortodyne Electronics (США) разработана установка М-20 с производительностью до 600 приборов/час (рис.3). Установка оснащена инструментом с двойной канавкой для сварки проволоки диаметром от 100 до 500 мкм, а также специальным инструментом для сварки ленточных перемычек шириной от 25 до 1000 мкм. Инструмент снабжен направляющей прорезью для петлевания и позиционирования ленты (рис.4).



**Рис.3.** Установка УЗ микросварки модели М-20



**Рис.4.** Инструмент для микросварки ленточных перемычек

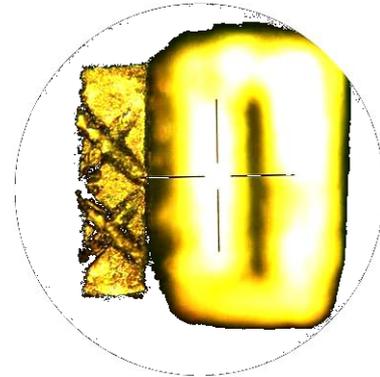
В большинстве сварочных установок используются УЗ колебания примерно постоянной амплитуды, что приводит к избыточному плавлению чистых поверхностей и недостаточному плавлению грубых или более загрязненных участков. Для устранения возможных дефектов сварки в модели М-20 преобразователь и генератор охвачены устройством обратной связи, которое осуществляет непрерывный

мониторинг процесса сварки и подстраивает амплитуду колебаний под особенности сварной поверхности. По мере достижения оптимальной деформации провода или перемычки амплитуда колебаний снижается, что обеспечивает воспроизводимость качества соединений при неоднородных условиях в зоне сварного контакта. В установке имеется цепь фазовой синхронизации, которая постоянно отслеживает частоту генератора и автоматически ее корректирует.

Монтаж алюминиевых ленточных (210x40 мкм) межсоединений проводился на установке ЭМ-4320 (УП «КБТЭМ-СО») с опцией разварки «клин-клин» (рис. 5). Особенностью данной установки является наличие рабочего столика с подогревом рабочей зоны до 350 С, что позволяет сваривать проводники из алюминия и золота. Быстросменная сварочная головка позволяет осуществлять оперативный переход на сварку методом «шарик-клин». Кроме того, установка ЭМ-4320 позволяет присоединять золотые и медные выводы методом микроконтактной сварки расщеплённым электродом типа ЭК-1, ЭК-2. В установке ЭМ-4320 (сварка «клин-клин»/«шарик-клин») используется УЗ система повышенной частоты – 110 кГц. Использование подобных систем в установках микросварки в настоящее время является мировым стандартом. Основное достоинство УЗ систем с частотой 100 кГц – возможность присоединения проводников, преимущественно золотых, при более низких температурах, чем при применении «традиционных» УЗ-систем на 60 кГц. Используемый в установке автономный УЗ генератор (УЗГ) выполнен на базе микроконтроллерного управления, обеспечивающего автоматическую настройку на резонансную частоту и контроль основных параметров (импеданс, частота). Максимальная выходная мощность УЗГ на стандартной нагрузке 35 Ом – 4 Вт, что позволяет присоединять проводники диаметром/толщиной до 75 мкм. При УЗ микросварке использовался доработанный микроинструмент КУТ5 (рис. 6) с прямоугольным отверстием для подачи алюминиевой ленты под торец микроинструмента.



**Рис. 5.** Многоопциональная сварочная установка ЭМ-4320



**Рис. 6.** Внешний вид рабочего торца сварочного микроинструмента

При разварке алюминиевых ленточных межсоединений толщиной 40 мкм был определён оптимальный режим: нагрузка – 80 г, время сварки – 60 мс, выходная мощность УЗГ – 1,2 Вт.

### **Контроль качества микросварных соединений**

Оценка качества сварных соединений ленточных перемычек с целью оптимизации режимов сварки проводилась методом неразрушающей лазерной фотоакустической диагностики. В основе данного метода используется фотоакустический эффект, который возникает при точечном сканирующем воздействии модулированного лазерного излучения на поверхность исследуемого объекта. Вследствие периодического нагрева и тепловой деформации локальных областей объекта в нем возбуждаются и распространяются объёмные ультразвуковые волны, которые с помощью акустоэлектрического датчика преобразуются в сигнал фотоакустического отклика, обработка параметров которого даёт возможность получить достоверную информацию о неоднородностях внутренней структуры исследуемого объекта [9].

Для интерпретации результатов контроля данная информация визуализируется в виде цветной 16-градационной 2-D фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен чёрным цветом, а по мере увеличения несплошности (расслоения, полости, инородные включения) цветовая гамма меняется вплоть до белого цвета, проходя все цветовые оттенки, показанные на шкале (рис. 7).

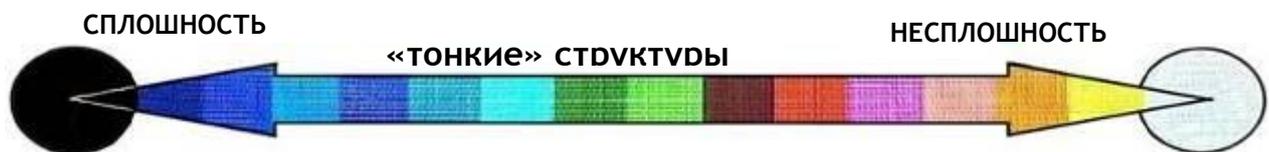


Рис. 7. Цветная 16-градационная шкала

Внешний вид контролируемых соединений ленточными перемычками показан на рис.8.

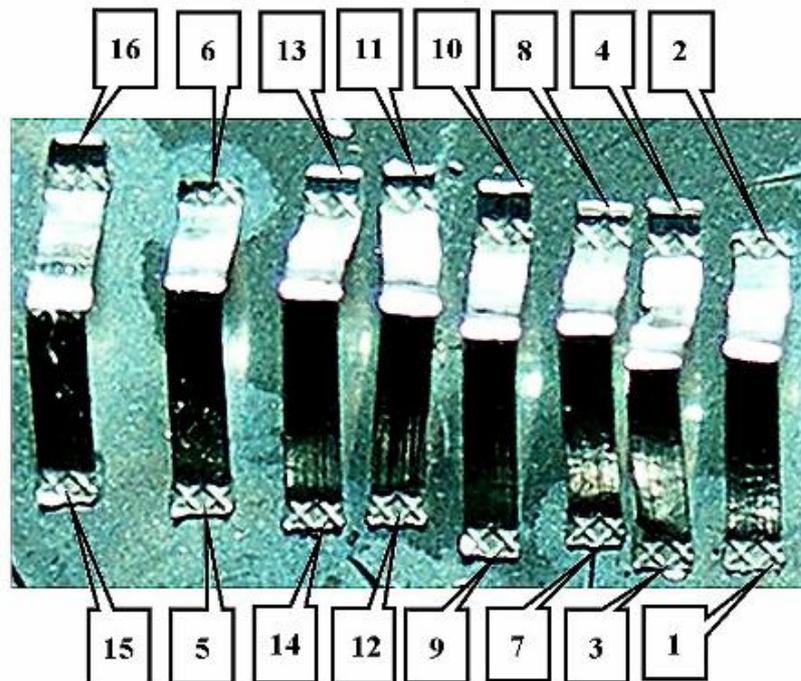
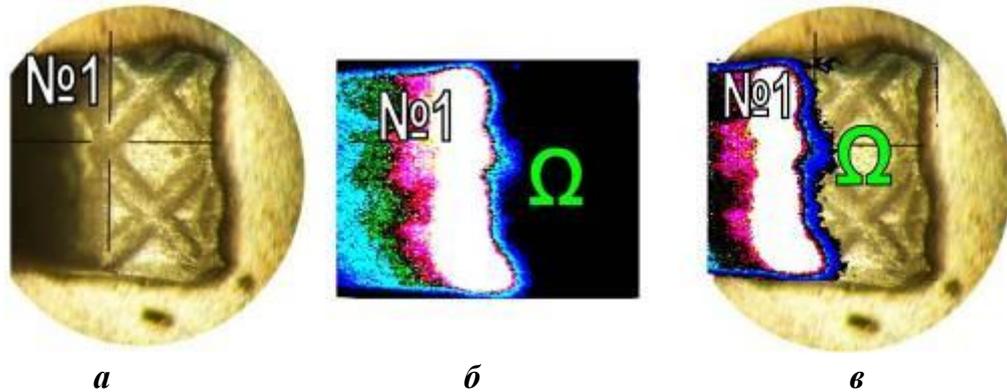


Рис. 8. Внешний вид контролируемых соединений ленточными перемычками

Для большей наглядности проведено совмещение изображений (рис. 9*в*), а именно: на оптическое изображение микросварного соединения (рис. 9*а*) поверх с соблюдением масштаба накладывалась соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (рис. 9*б*). Причём, чёрному цвету, указывающему на области отсутствия несплошности, задавалась прозрачность. Эта операция позволяет количественно оценить площадь омического контакта, образовавшегося в каждом конкретном случае микросварки.



**Рис. 9.** Внешний вид (*а*) качественного микросварного соединения №1 и соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (*б*); (*в*) – совмещение изображений *а* и *б*



**Рис. 10.** Внешний вид некачественного микросварного соединения №6 и соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма

В качестве критерия при контроле качества соединений взято отношение значения площади областей несплошности сварного соединения по размеру светлых областей, перекрывающих отпечаток рабочего торца микроинструмента, к общей площади соединения (100 x 200 мкм). Измерена прочность перемычек на отрыв, и рассчитан процент потери прочности по отношению к прочности ленты на разрыв (0,45 Н).

В таблице приведены максимальные значения несплошности сварных соединения для каждой перемычки, выраженные в процентном отношении к площади отпечатка рабочего торца сварочного микроинструмента.

Таблица. Характеристики качества сварных соединений ленточными перемычками

№ соединения	1	2	3	4	5	6
--------------	---	---	---	---	---	---

Максимальная несплошность соединения, %	5	12	15	20	40	60
Прочность на отрыв, Н	0,43	0,37	0,36	0,33	0,31	0,21
Снижение прочности по отношению к прочности ленты на разрыв, %	4	17	20	26,7	31	53

Отрыв ленты происходил именно на тех сварных соединениях, где на лазерных фотоакустических топограммах регистрировалась максимальная несплошность в слое взаимодействия свариваемых материалов (светлые области). Эталонном качественном соединении служили сварные точки для перемычек №1 и №2, полученные при значениях режима сварки: усилие нагружения  $F = 80$  г, длительность сварочного импульса 60 мкс, мощность сварочного импульса  $P = 90$  у. е.

### Заключение

Анализ факторов прочности микросварных соединений показал, что основными параметрами режима сварки являются: мощность колебательной системы, контактное давление, амплитуда колебаний сварочного наконечника и время сварки. Разработана установка с повышенной частотой ультразвука и инструмент для ультразвуковой микросварки проволочных выводов больших диаметров и ленточных выводов при монтаже мощных полупроводниковых приборов. Методом лазерной фотоакустической диагностики установлено, что дефекты, возникающие при монтаже с помощью ленточных перемычек, наблюдаются в местах несплошности сварных соединений.

### Литература

1. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микросварной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1986.
2. Технология СБИС. Кн. 2. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.
3. Мазур А.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1981.
4. Онегин Е.Е., Зенькович В.А., Битно Л.Г. Автоматическая сборка ИС. Минск: Высшая школа, 1990.
5. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка. Л.: Машиностроение, 1972.
6. Materials and Technology of Contact Joints Made Using Ultrasonic Microwelding /A.A. Khmyl, A.P. Dostanko, V.L. Lanin, V.A. Emelyanov // Proceeding XVI Intern. Conf. ICES' 92, Loughborough, England.
7. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем // Технологии в электронной промышленности. 2006, № 5.
8. Емельянов В.А. Технология микромонтажа интегральных микросхем. Минск: Белнауча, 2002.
9. Волкенштейн С.С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники // Компоненты и технологии, 2007, №11.