



# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

С. Волкенштейн, В. Ланин, А. Хмыль  
vlanin@bsuir.by

**В условиях все возрастающей функциональной сложности СБИС, а также с уменьшением типоразмеров дискретных элементов основным требованием к процессу выполнения паяных соединений является повышение их качества и надежности при возрастающем объеме промышленного производства. Лазерная фотоакустическая микроскопия, основанная на физико-технических принципах многоступенчатой обработки слабых сигналов, взаимодействующих с тепловыми неоднородностями исследуемых объектов, является серьезной альтернативой традиционным методам контроля.**

Переход к бессвинцовым технологиям актуален сегодня для всех предприятий, связанных с производством электронных модулей на печатных платах. Если еще недавно технологи считали, что их это не касается («поставка продукции, выпускаемой нашим предприятием, на европейский рынок не планируется»), то теперь их мнение изменилось, поскольку на предприятия начали поступать электронные компоненты с бессвинцовыми покрытиями выводов. Это повлекло за собой проблемы с качеством паяных соединений. Они связаны с фундаментальными физическими и химическими изменениями, которые происходят в процессе оплавления припоя. Эти изменения затрагивают не только процесс пайки, но и влияют на операции контроля качества паяных соединений [1].

В промышленном производстве наиболее часто используются в сочетании два метода контроля неразъемных соединений: разрушающий (выборочный) контроль качества по силе отрыва и характеру разрушения соединения и неразрушающий визуальный контроль — отбраковка потенциально ненадежных паяных соединений по результатам визуального осмотра. Такой способ контроля недостаточен для управления технологическим процессом монтажа межсоединений и прогнозирования их надежности ввиду его низкой информативности [2].

В этой связи наиболее перспективной для контроля паяных соединений становится фотоакустическая микроскопия, которая успешно развивается благодаря высокой информативности, отсутствию существенного воздействия на образец, однозначности и воспроизводимости получаемой информации, полностью отражающей физическую сущность контролируемых характеристик [3].

Ряд дефектов материалов и изделий, связанных с нарушением сплошности (зародышевые дефекты начальных стадий возникновения, включения, пустоты,

трещины, непропаи и т. п.), не всегда могут быть обнаружены существующими методами электронной, инфракрасной или рентгеновской микроскопии, но могут быть выявлены в процессе исследования их теплофизических характеристик при воздействии на исследуемый образец интенсивного сфокусированного модулированного электромагнитного излучения, в частности лазерного. В этом случае в объекте возникают определенные физические процессы. Первичным эффектом является заполнение верхних уровней резонансных переходов за счет поглощения фотонов [4], вторичными — релаксации возбуждения — излучательная и безызлучательная. Излучательная релаксация приводит к флуоресценции среды с соответствующим квантовым выходом и характеристическим временем и используется в основном в спектроскопических исследованиях в средах с высоким квантовым выходом в ультрафиолетовом и коротковолновом видимом диапазонах излучения. Безызлучательная релаксация приводит к нагреву среды за счет перехода энергии возбуждения в энергию колебания атомов и является, по существу, основным физическим процессом, протекающим в конденсированных средах. При этом возникают следующие физические процессы: нагрев поверхности объекта, диффузионный нагрев окружающей газовой среды, термоупругие деформации и тепловые волны в объекте. Каждый из перечисленных процессов вызывает изменение одного или нескольких параметров объекта или окружающей среды, которые могут служить источником информации о теплофизических свойствах.

Фотоакустическая микроскопия основана на взаимодействии сфокусированного в точку диаметром 5–70 мкм импульсного лазерного излучения (плотность мощности —  $10^4$ – $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность импульса — 30 нс) с поверхностью объекта. В результате поглощения излучения в облучаемой точке происхо-





дит импульсный нагрев и соответствующее тепловое расширение зоны нагрева, вследствие чего возникают ударные широкополосные акустические колебания различных типов (продольные, поперечные, поверхностные, изгибные), которые, распространяясь из точки возбуждения по всему объекту, взаимодействуют с его пространственно-геометрическими и структурно-механическими неоднородностями и с различными скрытыми дефектами.

При сканировании поверхности контролируемого объекта точка возбуждения акустических колебаний перемещается. Регистрируя пространственное распределение акустических откликов синхронно со сканированием, можно получить информацию о топографии свойств внутренней структуры контролируемого объекта. Эта информация выводится на цветное видеоконтрольное устройство и позволяет получить достоверные данные о теплофизических неоднородностях объектов путем обработки параметров электрических сигналов (амплитуды, фазы, времени задержки, спектра сигналов) и далее – получение изображения, доступного интерпретации [5–7]. Для приема и обработки фотоакустических сигналов отклика используется блок акустоэлектрического преобразователя объемных волн. Накопление и регистрация видеоинформации осуществляется блоком обработки информации.

Лазерная фотоакустическая микроскопия (ЛФМ) имеет определенные преимущества перед акустической и сканирующей лазерной акустической микроскопией:

- широкие возможности сканирования объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей при бесконтактном возбуждении акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера;
- при использовании лазера с перестройкой по длине волны можно получать видеоспектральные топограммы поглощения;
- не требуется создания иммерсионного контакта акустической части с объектом, что значительно расширяет область сканирования.

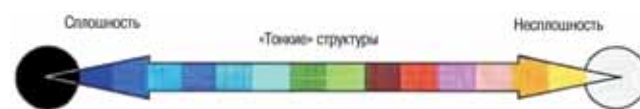
Основные технические характеристики комплекса лазерного фотоакустического диагностирования (рис.1) следующие:

- увеличение геометрическое – от 1:1 до 2500:1 крат на экране монитора 19”;
- число градаций отображаемого параметра – 16;
- максимальное поле сканирования – 100x100 мм;
- размеры образца – от 10 до 65 мм;
- пространственная разрешающая способность – от 0,5 до 100 мкм;
- чувствительность к нарушению сплошности структуры – до 10 нм;
- число строк сканирования – 256.

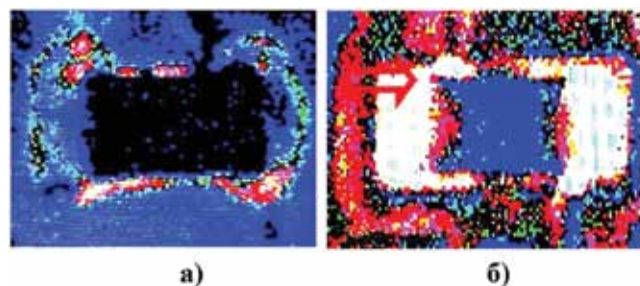
Для интерпретации результатов контроля данная информация визуализируется в виде цветной 16-гра-



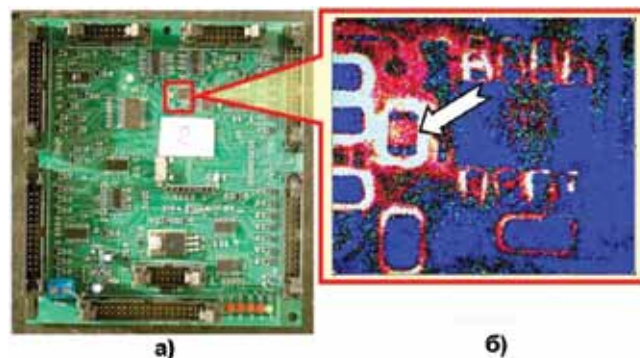
**Рис.1. Лазерный фотоакустический комплекс неразрушающего контроля**



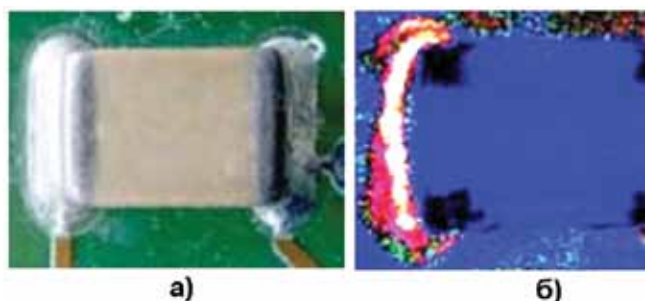
**Рис.2. Цветная 16-градационная шкала**



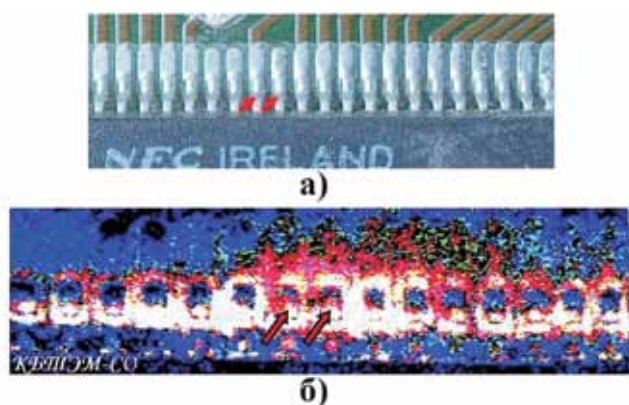
**Рис.3. Лазерные фотоакустические топограммы качественной пайки (а) и некачественной «холодной» пайки (б) чип-резисторов**



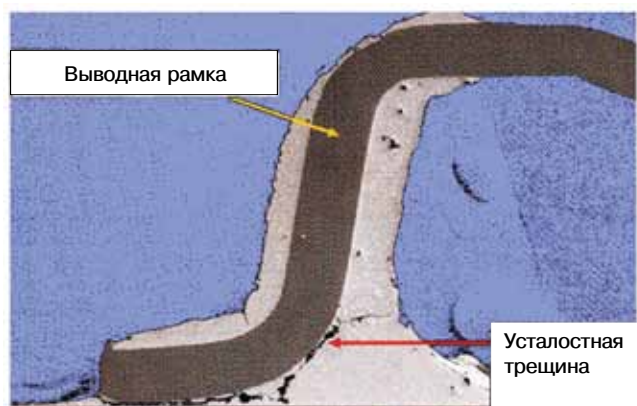
**Рис.4. Внешний вид печатной платы с SMD-элементами (а) и лазерная фотоакустическая топограмма (б) участка платы с некачественным (расслоившимся) чип-конденсатором (указано стрелкой)**



**Рис.5. Внешний вид (а) и лазерная фотоакустическая топограмма (б) качественной пайки чип-конденсатора**



**Рис.6. Фрагмент внешнего вида смонтированной интегральной микросхемы (а) (сборка Siemens) и соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (б). Стрелками показана неудовлетворительная пайка внешних выводов ИМС**



**Рис.7. Возникновение разрыва электрической связи вследствие появления усталостной трещины в паяном соединении**

дационной 2D фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен черным 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.2).

Лазерные фотоакустические (ЛФА) топограммы качественной и неудовлетворительной пайки чип-резисторов для сравнения показаны на рис.3.

Первые практические результаты контроля методом фотоакустической микроскопии были получены при оценке качества монтажа полупроводниковых кристаллов с максимальной разрешающей способностью 50 мкм и менее. Далее, по мере усовершенствования аппаратной части, разрешение было улучшено на два порядка (0,5 мкм). Сегодня метод ЛФМ дает возможность контролировать качество всех неразъемных соединений: от микросварных проволочных межсоединений до монтажных клеевых и паяных конструкций.

Примеры некачественных компонентов на печатной плате и качественного монтажа чип-конденсатора (сборка Siemens), полученные методом лазерной фотоакустической микроскопии, приведены на рис.4 и 5, соответственно.

В процессе эксплуатации может происходить деградация неразъемных соединений по различным причинам: несогласованность температурных коэффициентов выводной рамки и материала токопроводящих дорожек печатной платы, неудачное конструктивное решение монтажной конструкции крепления компонентов, низкий запас прочности вследствие плохого сцепления монтажных поверхностей с припоем и т. д. Примеры деградации паяных соединений внешних выводов ИМС показаны на рис.6 и 7.

Для оптимизации технологических сборочных операций требуется оперативная информация о внутренних неоднородностях, дефектах и тепловых свойствах неразъемных соединений и установление причинной связи их появления с технологией, конструктивными особенностями и прогнозируемой надежностью изделий. При проведении испытаний желательно сократить продолжительность и объем выборки, сохраняя возможность получения достоверных качественных и количественных оценок показателей надежности изделий. Лазерный фотоакустический метод контроля позволяет объективно проводить лабораторный неразрушающий экспресс-анализ с запоминанием промежуточных состояний испытуемого неразъемного соединения на различных этапах тестирования с последующим анализом динамики изменения его структуры, физических свойств [8].

Форсированные испытания модуля с конструкцией крепления полупроводникового прибора в корпусе ТО 220 (рис.8) заключались в ужесточении воз-



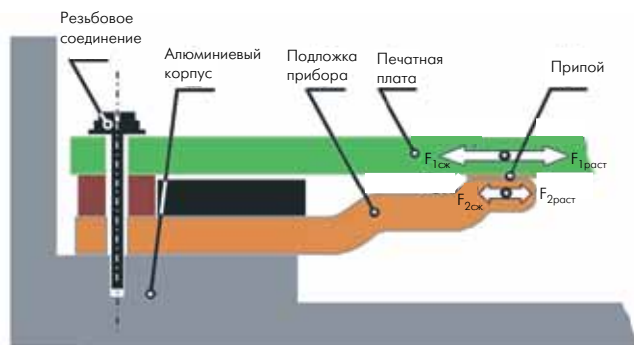
действующего температурного фактора ( $t_{\min} = -195 \text{ C}$ ,  $t_{\max} = 150 \text{ C}$ ). В данной конструкции имеется потенциально проблемное место – замкнутая механическая цепь «контактная площадка–припой–покрытие–подложка прибора–резьбовое соединение–участок стеклотекстолитовой платы под прибором», состоящая из двух параллельных участков (подложка прибора и плата), имеющих разные коэффициенты температурного расширения. При температурных перепадах в этой цепи должны возникать большие механические напряжения.

Перед началом испытаний было проведено лазерное фотоакустическое сканирование области паяных соединений (рис.9а), характеризующихся, как качественные (критерий – площадь зон омического контакта). После проведения полного цикла форсированных испытаний наблюдается полная деградация паяного соединения среднего вывода (рис.9б).

Неудачное техническое решение (отсутствие температурного компенсационного зазора) при сквозном монтаже светодиодов на плату (рис.10) вкпе с наличием окисных пленок на выводах привело к довольно быстрой деградации паяных соединений, что выразилось в нестабильности яркостных характеристик светодиодных табло.

Первичное сканирование паяных соединений светодиодов на платах показало неудовлетворительное сцепление припоя с поверхностью внешних выводов светодиодов (рис.11а). Поскольку вдоль границы раздела «вывод-припой» отсутствует сцепление, ультразвуковая волна проходит вдоль внешнего вывода с полным внутренним отражением, как в волноводе. При этом на ЛФА-топограммах регистрируется прямоугольное поперечное сечение внешних выводов светодиодов.

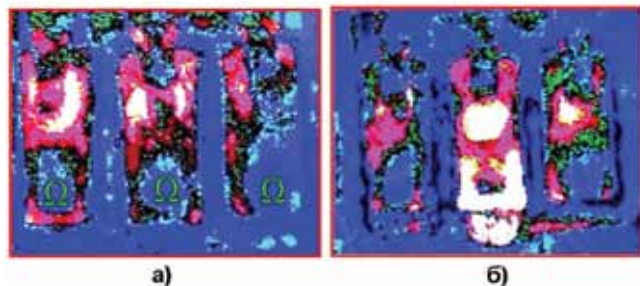
Повторное сканирование тех же самых паяных соединений проводилось после перемонтажа светодиодов с флюсовым облуживанием внешних выводов и обеспечением термокомпенсирующего зазора. На ЛФА-топограммах зарегистрировались зоны сцепле-



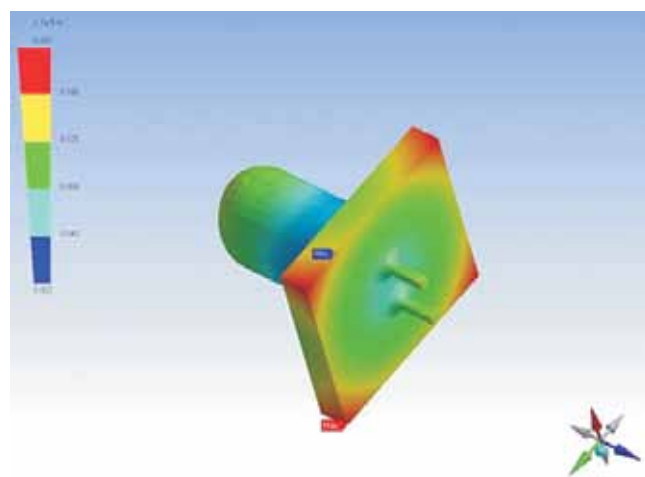
**Рис.8. Эскиз исследуемой монтажной конструкции крепления полупроводникового прибора в корпусе ТО-220**

ния вдоль всех граней внешних выводов светодиодов (рис.11б).

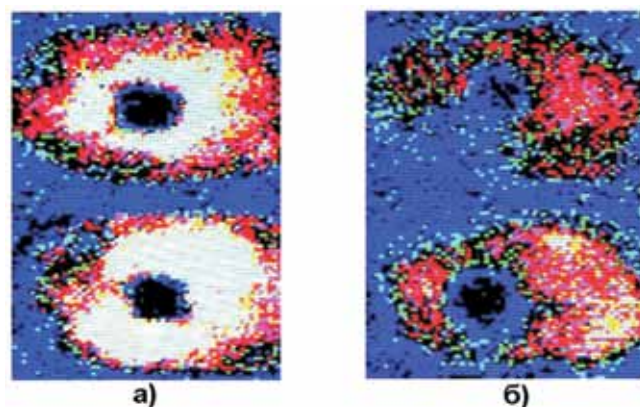
Пространственная разрешающая способность ЛФМ от 0,5 до 100 мкм, чувствительность к наруше-



**Рис.9. Лазерные фотоакустические топограммы паяных соединений: а – до испытаний, б – после испытаний термоударом**



**Рис.10. Компьютерная модель монтажной конструкции светодиода**



**Рис.11. Типовые лазерные фотоакустические топограммы паяных соединений светодиодов при сквозном монтаже на плату: а – первичное сканирование, отсутствие сцепления припоя с поверхностью вывода, б – повторное сканирование после обеспечения всех условий качественной пайки**

нию сплошности сцепления до 10 нм, диапазон увеличения от 1:1 до 2500:1 позволяют проводить контроль качества и диагностику неразъемных соединений широчайшего спектра изделий электронной техники и микроэлектроники: от микросварных межсоединений до герметизирующих швов металлических корпусов.

Этот метод должен стать стандартным инструментом для 100%-ного неразрушающего контроля и анализа наиболее ответственных узлов аппаратуры специального назначения, что будет являться своеобразным пропуском в эру бездефектного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гафт С., Матов Е. Печатный монтаж. Стратегия контроля качества при переходе к бессвинцовым технологиям. — Электроника: НТБ, 2004, № 5.
2. Фотоакустический метод неразрушающего контроля качества микросварных соединений полупроводниковых приборов и ИС / А.Д. Беляев, С.А. Голомеева, В.Г. Гриц, Ю.П. Ключев, З.Ч. Сушинский, Б.А. Цыганок. — Электронная техника. Сер.2, вып. 6, 1989, с. 46–50.
3. Фотоакустическая микроскопия — новое средство неразрушающей диагностики и контроля материалов и изделий электронной техники /С.С. Гапонов, Г.Л. Горшков, Л.М. Кузнецов, Н.В. Рабодзей. — Элект-

ронная промышленность, 1986, № 6, с. 72–73.

4. Жаров В.П. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. — М.: Мир, 1984.

5. Авербах В.И., Волкенштейн С.С., Школык С.Б. Метод лазерной фотоакустической диагностики качества монтажа кристаллов, сварных и паяных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники. — J. China Integrated Circuit, v. 64, 2004, p. 66–69

6. Волкенштейн С.С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники — Технологии в электронной промышленности, 2007, № 11, с. 154–158.

7. Ланин В.Л., Волкенштейн С.С. Контроль паяных соединений при поверхностном монтаже СБИС. — Технологии в электронной промышленности, 2009, №4, с. 34–36.

8. Деградация паяных соединений электронных компонентов в процессе эксплуатации в связи с конструктивными особенностями монтажа. — С.С. Волкенштейн, А.А. Иванов, А.Ф. Керенцев, А.А.Хмыль. // Материалы XIV Междунар. научно-технической конф. «Современные средства связи». — Минск, 2009, с. 91–92.