

УДК 621.385.6

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Дайняк И.В.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>3</sup><sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Разработанный метод лазерной фотоакустической (ЛФА) интроспекции доказал эффективность контроля качества и диагностики неисправностей во всём диапазоне сборочных операций при производстве изделий электронной техники и микроэлектроники (ИЭТиМЭ) применительно ко всем типам неразъёмных соединений, используемых в монтажных конструкциях приборов [1].

Подтверждение достоверности любого метода интроскопии обеспечивается сравнением полученных данных с результатами других методов, а также с итогами проведенного в последнюю очередь разрушающего контроля, позволяющего воочию убедиться в наличии внутренних дефектов исследуемой структуры, сопоставить их расположение и конфигурацию. Однако, в данном случае, разрушенный исследуемый образец не годится для проведения дальнейших циклов испытаний и эксплуатации.

В виду высокой чувствительности к нарушению сплошности (единицы нм, что было доказано опытным путём), метод ЛФА интроспекции требует подтверждения достоверности именно в области тонких структур, недоступной для всех известных нам традиционных методов неразрушающего контроля.

Очень хорошим дополнением к лазерной фотоакустике в плане исследования монтажных конструкций «п/п кристалл - подложка» является метод лазерной микроинтерферометрии, который позволяет проводить качественную и количественную оценку состояния исследуемых объектов путём определения характера объёмной деформации смонтированных п/п кристаллов и вычисления интегральной составляющей остаточного механического напряжения с чувствительностью к нарушению сплошности сравнимой с ЛФА, что даёт возможность оценить устойчивость конструкций к механическим, электрическим и тепловым нагрузкам и прогнозировать эксплуатационную надёжность готовых ИЭТиМЭ.

Практическая целесообразность применения лазерной интерферометрии для оценки качества присоединения кристаллов и определения в них интегральной составляющей остаточных внутренних напряжений была доказана совпадением расчётных результатов с данными локальных измерений механических напряжений в кристаллической решётке методом двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии [2].

Возникновение остаточных внутренних напряжений, приводящих к объёмной деформации п/п кристаллов, искажающей профиль их планарной поверхности и регистрируемой на лазерных интерферограммах, обусловлено неоднородностями монтажного слоя, вызванными особенностями адгезионных свойств монтажных поверхностей «п/п кристалл - подложка», неравномерностью толщины адгезива, наличием пустот. Цифровая обработка интерферограммы позволяет построить матрицу деформации с последующим представлением профиля деформированного п/п кристалла в трехмерном пространстве.

Таким образом, отталкиваясь от метрологически доказанной достоверности метода лазерной интерферометрии в области количественного определения интегральной составляющей остаточных механических напряжений в смонтированных п/п кристаллах и проведя сравнительный статистический анализ, можно дополнить процедуру подтверждения достоверности лазерного фотоакустического метода в области тонких структур несплошности монтажного слоя конструкций «п/п кристалл - адгезив/припой-подложка».

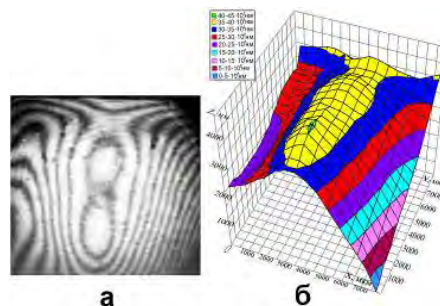


Рисунок 1 – Лазерная интерферограмма п/п кристалла (а) и 3D-модель профиля планарной поверхности исследуемого п/п кристалла (б)

Контроль качества монтажной конструкции «п/п кристалл - адгезив - керамика» проводился методами лазерной интерферометрии (рисунок 1 а) и лазерной фотоакустической микроскопии (рисунок 2б). Путём оцифровки лазерной интерферограммы (рисунок 1 а) была реализована матрица №1 [10x9] деформации планарной поверхности п/п кристалла и построена 3D-модель профиля планарной поверхности (рисунок 1б). Также с помощью цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъёмных соеди-

нений лазерным фотоакустическим методом (рисунок 2а) была реализована матрица №2 [10x9] распределения несплошности в монтажном слое на основе лазерной фотоакустической топограммы (рисунок 2 б).

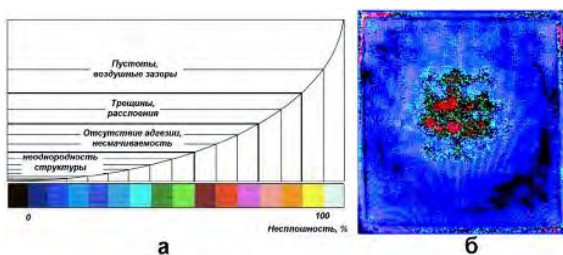


Рисунок 2 – Цветная 16-градационная шкала для оценки качества неразъёмных соединений лазерным фотоакустическим методом (а), лазерная фотоакустическая топограмма исследуемого п/п кристалла (б)

Аналогичным образом для сравнения рентгеноскопии с лазерной фотоакустикой на основе рентгенограммы (рисунок 3б) и фотоакустической топограммы (рисунок 3в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл - адгезив - керамика» (рисунок 3а) были реализованы две матрицы №3, №4 [10x9] распределения несплошности в адгезионном слое.

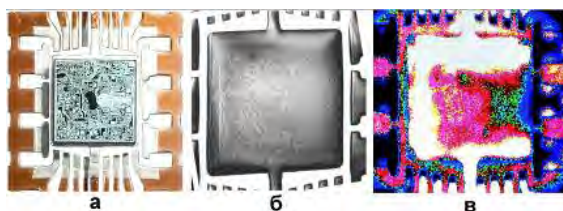


Рисунок 3 – Внешний вид (а), рентгенограмма (б) и лазерная фотоакустическая топограмма (в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл - адгезив - кристаллодержатель»

Сравнительный анализ двух пар последовательностей дискретных величин полученных оцифровкой визуализированных результатов проведения исследования одного и того же объекта с помощью вышеупомянутых методов проводился на основе корреляционного анализа [3].

Рассмотрев матрицы №1, №2, №3 и №4 как выборки для  $i = 1, 2, \dots, 90$ , коэффициент взаимной корреляции двух из них может быть рассчитан по формуле

$$r_{XY}(k) = \frac{V_{XY}(k)}{S_X \cdot S_Y}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{XY}(k)$  – выборочная корреляционная функция;  $S_X, S_Y$  – среднеквадратические отклонения выборок X и Y соответственно.

Выборочная корреляционная функция имеет для рассматриваемого в статье случая следую-

щий вид:

$$V_{XY}(k) = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (X_i - M_X) \cdot (Y_{i+k} - M_Y), \quad (2)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $M_X, M_Y$  – математические ожидания для выборок X и Y соответственно, в качестве которых нами были взяты среднее арифметическое всех значений:

$$M_X = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} X_i; \quad M_Y = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} Y_i. \quad (3)$$

В свою очередь, среднеквадратические отклонения для выборок X и Y вычисляются, соответственно, по формулам

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (X_i - M_X)^2}; \quad S_Y = \sqrt{\frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (Y_i - M_Y)^2}. \quad (4)$$

Согласно результатам вычислений, выполненных по формулам (1) – (4) для пары дискретных распределений «интерферометрия–фотоакустика», которым соответствуют матрица №1 (выборка X) и матрица №2 (выборка Y), для значения  $k=0$  нами получен коэффициент корреляции, равный  $\gamma_{XY}=0,6813$ .

Аналогичный расчёт по формулам (1)-(4) был выполнен и для пары дискретных распределений «рентген - фотоакустика», которым соответствуют матрица №3 (выборка X) и матрица №4 (выборка Y), в результате расчёта для значения  $k=0$  нами получен коэффициент корреляции, равный  $\gamma'_{XY}=0,2663$ . Из этого следует, что, несмотря на «грубое» приближение при оцифровке визуализированных результатов исследований проведенных тремя различными методами неразрушающего контроля, существует явная статистическая взаимосвязь этих трёх методов. Причём, рентгеноскопия, как метод интроскопии, коррелирует с фотоакустикой хуже, чем интерферометрия, поскольку на рентгенограммах в теневом контрасте, при высокой пространственной разрешающей способности, регистрируются несплошности, относящиеся к пустотам, зазорам, расслоениям, трещинам, что соответствует только четырём градациям в верхней части цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъёмных соединений лазерным фотоакустическим методом (рисунок 3а). Интерферометрия и лазерная фотоакустическая микроскопия – высокочувствительные методы позволяющие выявлять нарушения сплошности монтажных конструкций «п/п кристалл-подложка».

1. Волкенштейн С.С., Хмыль А.А. Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС. Технологии в электронной промышленности. – №2. – 2011. – С. 18-22.
2. Научно-технический отчёт по НИР «Исследо-

вание технологических приёмов автоматизированной сборки ГИС и БИС», госрегистрация № У99678. – 1984. – 152 с.

3. Карпович-Каспжак О.С., Дайняк И.В., Генюс А.В. Методика определения взаимного соот-

ветствия текста и реферата на основе корреляционного анализа // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/1. – С. 84-86.

УДК 620.16(075.8)

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОКОМПОЗИТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Минько Д.В.<sup>1</sup>, Белявин К.Е.<sup>1</sup>, Шаронов Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ

Минск, Республика Беларусь

Разработка и исследования оптических свойств преобразователей инфракрасного лазерного излучения на основе редкоземельных элементов, обладающих интенсивной ап- конверсионной люминесценцией, является одним из перспективных направлений в оптоэлектронике и лазерной технике. Механизм возбуждения антистоксовой люминесценции основывается на процессе сенсбилизации путем передачи энергии через промежуточные возбужденные состояния, а также через кооперативные процессы, когда в элементарном акте возбуждения активатора участвуют одновременно несколько ионов сенсбилизатора [1].

В настоящее время мировой рынок лазеров с длиной волны 0,8...1,6 мкм составляет сотни тысяч штук. Современные конструкции визуализаторов (рисунок 1), преобразующих инфракрасное лазерное излучение в видимый свет, не могут в полной мере удовлетворить потребности все возрастающего рынка [2-5].

Все более востребованы новые материалы и подходы, позволяющие увеличить их функциональные возможности: чувствительность, пространственное разрешение, лучевую прочность, спектральный диапазон, эксплуатационную стойкость, линейные размеры регистрируемых полей и др. Появление на рынке мощных инфракрасных технологических лазеров, включая волоконные, вызвало необходимость создания широкоапертурных люминесцирующих экранов с высокой лучевой прочностью. Использование таких экранов для настройки и наведения излучения лазера на обрабатываемую поверхность деталей машин позволит существенно повысить производительность и качество термической обработки. Кроме того, для многих промышленных, медицинских и исследовательских работ остаются актуальными вопросы индивидуальной защиты и предотвращения производственных травм пользователя при работе с лазерами инфракрасного диапазона.



Рисунок 1 – Визуализаторы инфракрасного излучения для лазеров импульсного и непрерывного действия

В этой связи большой интерес вызывают оптически прозрачные материалы на основе композитов, полученных методом электроимпульсного прессования в вакууме микропорошка стекла с добавкой наполнителя в виде оптически активных компонентов на основе редкоземельных элементов (РЗЭ).



Рисунок 2 – Экспериментальная установка электроимпульсного прессования