

УДК 621.385.6

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ МОНТАЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ «П/П КРИСТАЛЛ – ПОДЛОЖКА»

С.С. ВОЛКЕНШТЕЙН*, И.В. ДАЙНЯК, А.А. ХМЫЛЬ

ОАО «ПЛАНАР-СО», пр. Партизанский, 2, Минск, 220033, БеларусьБелорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 3 сентября 2015*

Лазерная микроинтерферометрия является традиционным методом неразрушающего контроля и имеет очень высокую чувствительность к нарушению сплошности неразъемных соединений этих конструкций. Ее возможности были ранее расширены применительно к изучению особенностей монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка», что дало возможность оценить их устойчивость к механическим, электрическим и тепловым нагрузкам и прогнозировать эксплуатационную надежность готовых изделий электронной техники и микроэлектроники. Достоверность и практическая целесообразность применения вышеуказанного метода были метрологически доказаны. Основываясь на высокой чувствительности и отталкиваясь от метрологически доказанной достоверности лазерной микроинтерферометрии, была подтверждена достоверность вновь разработанного высокочувствительного метода лазерной фотоакустической интроскопии в области «тонких» структур несплошности неразъемных соединений данных конструкций. Сравнительный анализ вышеупомянутых методов проводился на основе корреляционного анализа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, интерферометрия, лазерная фотоакустическая интроскопия, неразъемные соединения, корреляционный анализ.

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, сопоставить расположение и конфигурацию внутренних дефектов исследуемой структуры. Однако, в данном случае, разрушенный исследуемый образец не годится для проведения дальнейших циклов испытаний и эксплуатации. Для оценки качества монтажных соединений сравним результаты, полученные тремя используемыми в микроэлектронике методами: рентгеновской интроспекции (РИ) [1], лазерной микроинтерферометрии (ЛМИ), лазерной фотоакустики (ЛФА) [2]. На рис. 1 приведены внешний вид (а), рентгенограмма (б) и лазерная фотоакустическая топограмма (в) монтажной конструкции «кристаллодержатель–адгезив–кристалл» БИС. Адгезив – токопроводящий, Ableter M. Несмотря на видимые на рентгенограмме (рис. 1, б) мелкие пустоты, позволяющие отнести данную конструкцию к разряду удовлетворительного качества, истина открывается при взгляде на лазерную фотоакустическую топограмму (рис. 1, в) – п/п кристалл по трем сторонам не имеет крепления к кристаллодержателю. Качество данной конструкции – неудовлетворительно. Это свидетельствует о том, что лазерный фотоакустический метод контроля неразъемных соединений имеет целый ряд преимуществ по сравнению с методом рентгеновской интроспекции. Во-первых, это высочайшая чувствительность к нарушению сплошности монтажного слоя (единицы нанометра), во-вторых, не все современные адгезивы можно увидеть с помощью рентгена, в то время как лазерный фотоакустический метод лишен этого недостатка [2].

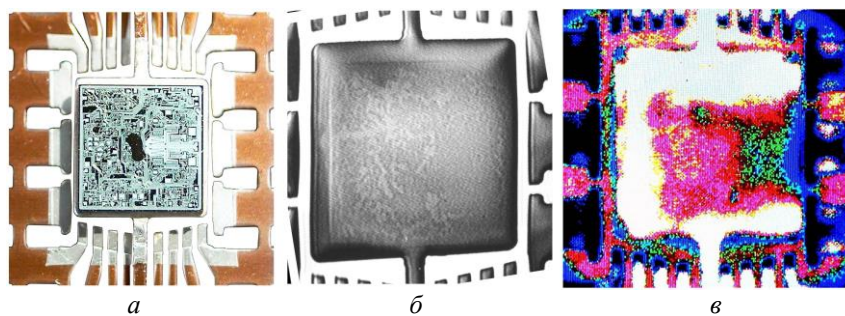


Рис. 1. Внешний вид (а), рентгенограмма (б) и лазерная фотоакустическая топограмма (в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл–адгезив–кристаллодержатель»

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 путем определения характера объемной деформации смонтированных п/п кристаллов и вычисления интегральной составляющей остаточного механического напряжения, что дает возможность оценить устойчивость конструкций к механическим, электрическим и тепловым нагрузкам и прогнозировать эксплуатационную надежность готовых изделий электронной техники и микроэлектроники.

Практическая целесообразность применения лазерной интерферометрии для оценки качества присоединения кристаллов и определения в них интегральной составляющей остаточных внутренних напряжений была доказана совпадением расчетных результатов с данными локальных измерений механических напряжений в кристаллической решетке методом двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии [3].

Возникновение остаточных внутренних напряжений, приводящих к объемной 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».

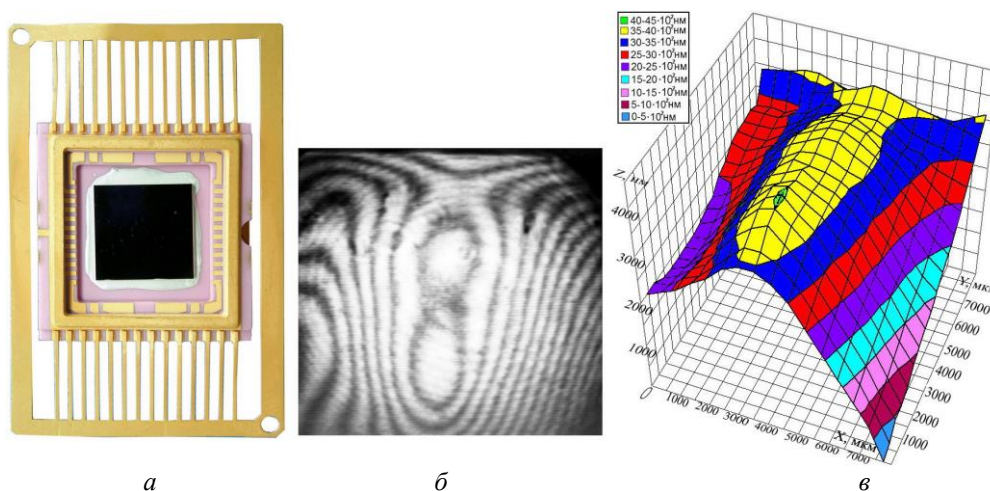


Рис. 2. Внешний вид (а), лазерная интерферограмма п/п кристалла (б) и 3D-модель профиля планарной поверхности исследуемого п/п кристалла (в)

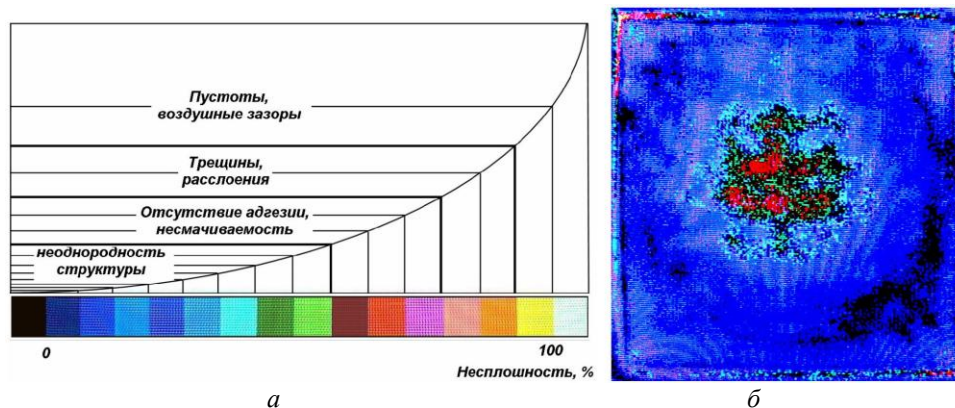


Рис. 3. Цветная 16-градационная шкала для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (а), лазерная фотоакустическая топограмма исследуемого п/п кристалла (б)

Контроль качества монтажной конструкции «п/п кристалл–адгезив–керамика» (рис. 2, а) проводился методами лазерной интерферометрии (рис. 2, б) и лазерной фотоакустической микроскопии (рис. 3, б). Путем оцифровки лазерной интерферограммы (рис. 2, б) была реализована матрица № 1 [10×9] деформации планарной поверхности п/п кристалла и построена 3D-модель профиля планарной поверхности (рис. 2, в). Также с помощью цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (рис. 3, а) была реализована матрица № 2 [10×9] распределения несплошности в монтажном слое на основе лазерной фотоакустической топограммы (рис. 3, б).

Матрица № 1 деформации планарной поверхности п/п кристалла:

90	95	100	101	101	95	90	83	85
70	78	85	92	93	90	80	70	75
55	70	83	98	100	94	81	69	68
42	61	82	99	105	99	86	69	60
33	55	80	95	101	99	85	65	52
25	50	77	93	100	97	83	60	48
15	43	71	91	101	100	84	59	43
14	38	65	90	103	100	82	58	43
23	30	58	81	101	100	79	58	48
30	20	49	73	91	90	73	60	52

Матрица № 2 распределения несплошности в монтажном слое:

6	5	6	5	6	6	6	5	7
6	5	5	5	6	6	5	2	2
5	5	6	7	7	6	6	5	2
2	5	6	7	8	7	6	5	3
2	5	7	9	11	11	7	6	5
1	3	7	9	11	11	7	6	3
1	3	4	7	9	9	7	5	3
3	1	3	5	6	5	5	3	6
2	2	1	3	4	4	4	5	6
4	3	3	3	3	5	6	6	7

Аналогичным образом для сравнения рентгеноскопии с лазерной фотоакустикой на основе рентгенограммы (рис. 1, б) и фотоакустической топограммы (рис. 1, в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл – адгезив – керамика» были реализованы две матрицы № 3, № 4 [10×9] распределения несплошности в адгезионном слое. 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 [4].

Матрица № 3 распределения несплошности в монтажном слое:

2	1	2	1	1	2	1	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	2	2	1
1	1	1	1	1	1	2	2	1
1	1	1	1	1	2	2	2	1
1	2	1	1	2	2	2	2	1
1	1	1	2	2	1	2	2	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

Матрица № 4 распределения несплошности в монтажном слое:

16	16	16	16	16	16	16	16	5
16	16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	15	16	16	16	15	15	10
16	12	12	10	9	11	10	11	7
16	16	11	11	11	10	10	10	5
16	16	11	12	12	11	9	9	3
16	16	11	12	12	11	9	9	3
16	16	12	12	12	10	10	10	7
16	16	12	11	11	10	12	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16

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

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

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 следующий вид:

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

где $k = 0, 1, 2, \dots$; M_X, M_Y – математические ожидания для выборок X и Y соответственно, в качестве которых авторами было взято 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 $r_{XY} = 0,6813$.

Аналогичный расчет 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 расчета для значения $k = 0$ нами получен коэффициент корреляции, равный $r'_{XY} = 0,2663$. Из этого следует, что, несмотря на «грубое» приближение при оцифровке визуализированных результатов исследований, проведенных тремя различными методами неразрушающего контроля, существует явная статистическая взаимосвязь этих трех

методов. Причем, 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 четырем градациям в верхней части цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (рис. 3, а). Интерферометрия и лазерная фотоакустическая микроскопия – высокочувствительные методы, позволяющие выявлять нарушения сплошности монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка».

На сегодняшнем этапе развития методов и средств контроля качества и диагностирования изделий электронной техники и микроэлектроники (ИЭТ и МЭ) наиболее совершенной является лазерная фотоакустическая интроскопия [5], превосходящая по своим техническим возможностям все известные созданные промышленные образцы приборов для вышеуказанных целей (рентгеновские микроскопы и томографы, ультразвуковые микроскопы, сканирующие лазерные микроскопы и т.д.). По сравнению с альтернативными методами лазерная фотоакустическая интроскопия является бесконтактной, неиммерсионной, высокочувствительной (чувствительность к нарушению сплошности порядка единиц нанометра, что соответствует толщине зарождающихся окисных пленок), с высоким пространственным разрешением, позволяющим исследовать микросварные неразъемные соединения (максимальное разрешение равняется 500 нм, поле сканирования 128×128 мкм), с широким диапазоном шагов регистрации акустического отклика (максимальный шаг регистрации 500 мкм, поле сканирования 128×128 мм), позволяющим охватить весь спектр сборочных операций в плане исследования неразъемных соединений в ИЭТ и МЭ. Дальнейшее повышение пространственной разрешающей способности возможно при переходе на другой источник возбуждения, поскольку в оптическом диапазоне уже достигнут предел. Так, электронно-лучевое импульсное зондирование позволит увеличить разрешение на несколько порядков.

COMPARATIVE ESTIMATION OF SEMICONDUCTOR DICE MOUNTING ALTERNATE NONDESTRUCTIVE EVALUATION METHODS

S.S. WOLKENSTEIN, I.V. DAYNIAK, A.A. KHYMYL

Abstract

Conventional method of nondestructive control – laser microinterferometry, which possibilities have been earlier expanded concerning to study “semiconductor chip – substrate” assemblies peculiarity, has given the chance to evaluate these assemblies stability to mechanical, electric and thermal loadings and to predict operational reliability of prefabricated production of electronic technics and microelectronics. Laser microinterferometry has very high sensitivity to undetachable connections continuity infringement of these constructions. The above-stated method reliability and practical expediency have been proved by metrological means. Being based on high sensitivity and making a start from laser microinterferometry metrological proved reliability, reliability of a new developed high-sensitive method – laser photoacoustic introscopy in the field of undetachable connections “delicate” structures discontinuity of the given constructions has been confirmed. The comparative estimation of two aforementioned methods was spent on the basis of the correlation analysis.

Keywords: nondestructive control, interferometry, laser photoacoustic introscopy, undetachable connections, correlation analysis.

Список литературы

1. Рети П. Неразрушающие методы контроля металлов. М., 1972.
2. Волкеништейн С. С., Хмыль А.А. // Докл. БГУИР. 2010. № 7 (53). С. 44–52.
3. Научно-технический отчет по НИР «Исследование технологических приемов автоматизированной сборки ГИС и БИС». № госрегистрации У99678. Минск, 1984.
4. Карпович-Каспжак О. С., Дайняк И. В., Генюс А. В. // Изв. Белорус. инж. акад. 2005. № 1(19)/1. С. 84–86
5. Волкеништейн С. С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. // Компоненты и технологии. 2007. № 11. С. 154–158.