

УДК 621.385.6

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Волкенштейн С.С.<sup>1</sup>, Антончик Л.С.<sup>1</sup>, Дайняк И.В.<sup>2</sup>, Хмыль А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>УО БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Подтверждение достоверности любого метода интроскопии обеспечивается сравнением полученных данных с результатами других методов. 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, была проведена процедура подтверждения достоверности лазерного фотоакустического метода в области тонких структур несплошности монтажного слоя конструкций «п/п кристалл-адгезив/припой-подложка» [1].

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.

С другой стороны, такую же матрицу деформации можно снять/получить непосредственно путём многоточечного измерения высоты планарной поверхности п/п кристалла контактным методом при помощи щупа преобразователя линейных перемещений (ПЛП), входящего в состав измерителя линейных перемещений (ИЛП). Таким образом, можно дополнить процедуру верификации разработанного метода лазерной фотоакустической (ЛФА) интроспекции, расширив диапазон методик измерений ещё одним инструментальным методом.

На рис. 1. приведена схема измерения профиля поверхности п/п кристалла смонтированного в металлокерамический корпус, которая состоит из: 1 – измеритель линейных перемещений НК-217; 2 – преобразователь линейных перемещений ПЛФ-10 Я2М3.468.157; 3 – трёхкоординатный микрометрический столик; 4 – штангенрейсмас ШР-250-0,05 ГОСТ 164-90; 5 – плита поверочная ТКП 630х400, кл. 0 ТУ 2-034-802-74; 6 – металлокерамический корпус со смонтированным п/п Si-кристаллом.

Измеритель линейных перемещений (ИЛП) (рис. 1, поз. 1) предназначен для измерения ли-

нейных размеров деталей, сборочных единиц, узлов СТО для производства изделий электронной техники и микроэлектроники. Номинальная цена единицы наименьшего разряда кода блока обработки квадратурных сигналов не более 0,0005 мм. Основная погрешность преобразователя линейных перемещений (ПЛП) (рис. 1, поз. 2) не более 0,002 мм.



Рисунок 1 – Схема измерения-профиля поверхности п/п кристалла смонтированного в металлокерамический корпус

Для эксперимента был выбран образец интегральной микросхемы (рис. 2) с большим сроком вылёживания (> 20 лет). По схеме, приведенной на рис. 1, щупом ПЛП (рис. 1, поз. 2) контактно был измерен профиль планарной плоскости п/п кристалла в 63-х точках с периодом 500 мкм задаваемым микрометрическим столиком (рис. 1, поз. 3). Матрица деформации п/п кристалла приведена в Таблице 1.

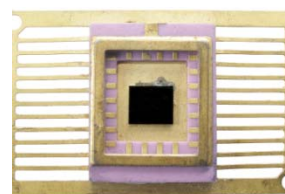


Рисунок 2 – Внешний вид металлокерамического корпуса со смонтированным п/п Si-кристаллом

Далее, на лазерном микроинтерферометре (рис. 3, а) была снята интерферограмма планарной поверхности исследуемого п/п кристалла (рис. 3, б).

Метод лазерной интерферометрии позволяет анализировать качество посадки кристаллов ИМС на подложки с применением эвтектики, мягких припоев, стекла, клеевых композиций и других материалов с качественной и интегрированной количественной оценками их напряжённо-деформированного состояния путём определения характера объёмной деформации смонтированных

п/п кристаллов по виду интерферограмм с учётом характера кривизны поверхности кристаллов (выпуклости и/или вогнутости).

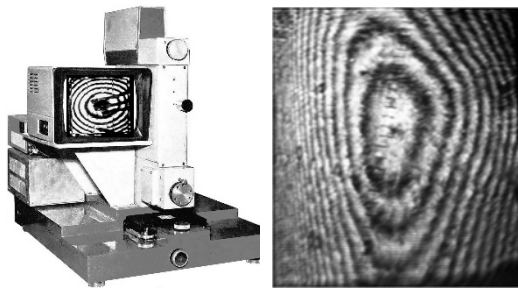


Рисунок 3 – Внешний вид лазерного микроинтерферометра (а) и интерферограмма исследуемого п/п кристалла (б)

При качественном соединении кристалла с подложкой интерферограмма имеет вид симметричных концентрично расположенных колец. Всякий дефект в зоне спая кристалла с подложкой приводит к образованию асимметричных интерференционных полос с увеличением плотности их распределения в зоне с повышенной деформацией. Сопоставив результаты анализа интерферограмм исходного (дооперационного) и напряжённо-деформированного (послеоперационного) состояний кристалла ИМС, можно оптимизировать режим выбранного технологического процесса и по достижении минимального уровня механических напряжений обеспечить качественную посадку кристаллов ИМС, что гарантирует воспроизводимость результатов монтажа межсоединений, стабильность параметров интегральных микросхем и их высокую эксплуатационную надёжность, а также позволяет в ходе проведения ускоренных циклов испытаний анализировать динамику изменения напряжённого состояния монтажной конструкции вследствие развития деградиционных процессов вплоть до появления параметрических и катастрофических отказов. Это в свою очередь, даёт возможность прогнозировать эксплуатационную надёжность исследуемых изделий электронной техники и микроэлектроники.

Цифровая обработка лазерной интерферограммы в 63-х точках позволила получить вторую матрицу деформации (таб. 2).

Таблица 1

590	600	730	840	900	925	940
475	545	590	745	810	780	845
380	500	515	685	760	740	795
245	385	420	590	670	630	685
205	350	375	575	615	590	635
90	225	275	485	500	500	540
40	180	200	410	420	425	475
30	65	95	315	340	355	375
0	20	40	275	240	240	300

Таблица 2

150	260	305	305	280	240	180
150	270	330	330	315	280	225
150	280	340	360	350	320	265
150	290	350	370	360	330	270
150	280	350	370	360	315	260
120	260	340	360	340	300	240
110	240	315	345	325	275	215
75	230	300	330	305	265	205
30	210	280	300	280	240	180

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 [1].

Рассмотрев матрицы Таб. 1, 2 как выборки для  $i = 1, 2, \dots, 63$ , коэффициент взаимной корреляции двух из них может быть рассчитан по формуле:

$$r_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{S_x S_y}, \quad (1)$$

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.

Согласно результатам вычислений, выполненных по формулам (1)–(2) для пары дискретных распределений «интерферометрия-контактный метод» для значения  $k = 0$  получен коэффициент корреляции, равный  $r_{xy} = 0,4104$ .

#### Выводы

В соответствии с результатами вычислений [1] были получены коэффициенты корреляции для пар дискретных распределений: «рентген-фотоакустика» – 0,2663; «фотоакустика-интерферометрия» – 0,6813, что говорит о большей достоверности, информативности и оперативности бесконтактных методов контроля фотоакустика и интерферометрия.

#### Литература

1. Волкенштейн С.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. Сравнительная оценка альтернативных методов контроля качества и диагностики монтажных конструкций «п/п кристалл-подложка» / «Производство электроники», 2017. – № 5. – С. 118-120.