

Измерения деформации при температурной нагрузке

При помощи метода TherMoire можно измерить деформацию ровных поверхностей и их изменения при температурной нагрузке. При этом используется принцип теневого муара. Возможен анализ температурной области до 260 °С. Примеры практических измерений на компонентах BGA, печатных платах и SMT-разъемах показывают, что изменения деформаций в рассмотренной температурной области могут быть иногда очень большими (например, 140 мкм на BGA). Эти сильные деформации могут быть источником повреждений в готовых электронных модулях.

Хайнц Вольрабе
(Heinz Wohlrabe),
д. т. н.

wohlrabe@zmp.et.tu-dresden.de

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

На рис. 1 представлен припаянный компонент BGA, на котором на внешних шариковых контактах есть трещины (вырывание контактной площадки). При анализе изображения повреждения четко видно, что зазор паяного соединения непараллельный. Возможной причиной тому может быть деформация корпуса компонента BGA во время пайки оплавливанием выше точки ликвидуса. Если деформация изменится после кристаллизации припоя, то в паяном соединении возникают вертикальные силы, которые, по крайней мере, могут способствовать вырыванию контактных площадок. Однако возможны и другие повреждения.

Для того чтобы проверить данное утверждение, необходимо измерить изменение формы компонентов BGA и других объектов в направлении оси Z в зависимости от температуры во время процесса пайки.

Метод измерения

Подобное измерение может быть проведено при помощи метода TherMoire (измерительный прибор фирмы Akrometrix, Atlanta). На рис. 2 продемонстрирован принцип измерения. Объект измерения освещается при помощи линейного источника света через линейную решетку. При этом возникает

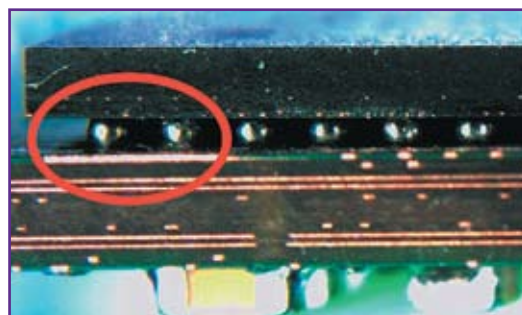


Рис. 1. Припаянный компонент BGA с трещинами на внешних шариковых контактах

теневого рисунка. Решетка имеет линейную плотность от 50 до 300 линий на дюйм (лнд). Освещаемые поверхности измеряемого объекта рассеянно отражают свет, и часть этого света снова проходит через линейную решетку, при этом происходит повторное отклонение. Интенсивность света точки измерения зависит, прежде всего, от расстояния этой точки до линейной решетки, так что при этом возможно измерить расстояние от точки до решетки. На рис. 3 представлены типичные теневые изображения.

Из теневых рисунков может быть получена информация о высоте с достаточно небольшим разрешением. Два теневые окружности передают разную высоту: от 80 мкм (300 лнд) до 500 мкм (50 лнд). Достигается обнаружение разницы расстояний приблизительно в 125 мкм при использовании типичной линейной решетки с плотностью 100 лнд. Еще одним недостатком является невозможность вычислить градиент высоты из этих изображений. Таким образом,

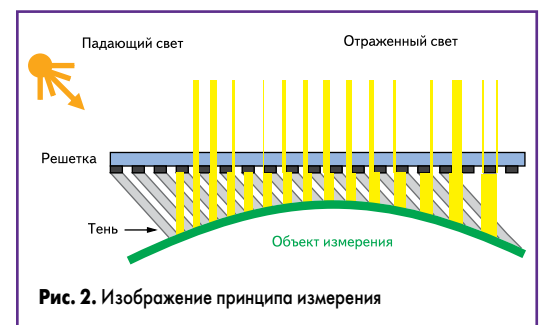


Рис. 2. Изображение принципа измерения

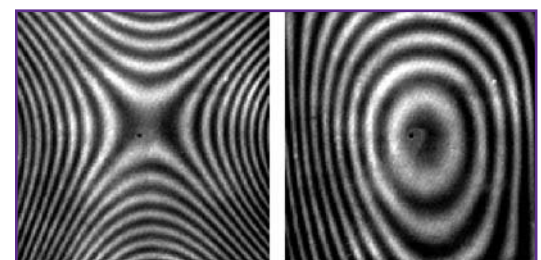


Рис. 3. Примеры полученных изображений

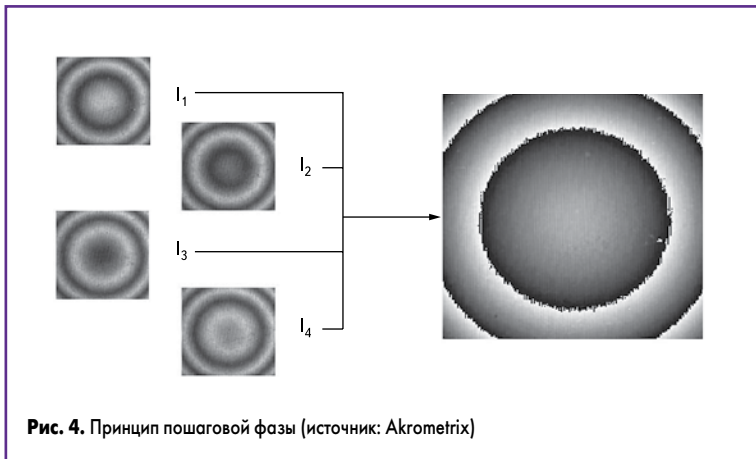


Рис. 4. Принцип пошаговой фазы (источник: Akrometrix)

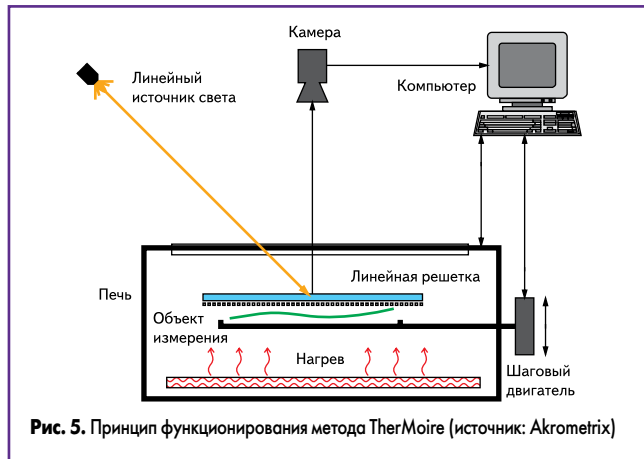


Рис. 5. Принцип функционирования метода TherMoire (источник: Akrometrix)

нельзя получить какие-либо применимые на практике результаты измерений.

Для того чтобы устранить данные недостатки, измеряемый объект располагается на четырех различных определенных высотах при помощи шагового двигателя, из-за чего тень перемещается (пошаговая фаза, рис. 4). Эти четыре изображения накладываются друг на друга и из результирующего наложенного (оверлейного) изображения можно вычислить значения высоты объекта с точностью приблизительно 2,5 мкм. Измерительный процесс длится около 2 с [1].

Измеряемый объект, линейная решетка и пошаговый двигатель помещаются в инфракрасную печь (рис. 5). Измеряемый объект при этом подогревается снизу. Управление нагревом осуществляется при помощи термоэлемента, расположенного на измеряемом объекте. При помощи специального конвекционного бокса можно создать конвекцию. Достижимые градиенты составляют 1 К/с (инфракрасный нагрев) и 0,25 К/с (конвекция). На рис. 6 изображен пример сравнения двух способов нагрева для компонента BGA 388. У нагрева инфракрасными лучами температурный профиль ближе к применяемым в практике профилям. Однако, так как нагрев происходит только снизу, образуются более высокие разницы температур (до 25 К) между верхней и нижней стороной исследуемого объекта, что не так существенно при конвекции.

Поэтому для практических измерений конвекция предпочтительней. Нагревание сверху исключено, так как оптимальные результаты измерений по причине оптического принципа

возможны лишь тогда, когда измеряемый объект находится очень близко к линейной решетке.

В отношении охлаждения между двумя видами нагрева нет разницы, хотя процесс охлаждения можно ускорить только при использовании определенных моделей приборов (CoolMoire).

Термоэлемент, который регулирует нагрев, помещается на верхнюю сторону измеряемого объекта. Температура нижней стороны контролируется при помощи второго термоэлемента. На рис. 7 изображен пример измерений. На этой диаграмме также показаны значения времени, при которых производится измерение деформации. В каждый из этих моментов времени создается оверлейное изображение, которое тоже анализируется.

Из-за режима нагрева практически невозможно избежать разницы температур между верхней и нижней стороной платы, что ведет к дополнительным деформациям измеряемого объекта. Однако на рис. 7 видно, что эта разница температур при нагреве, начиная с определенного момента времени, становится относительно постоянной и при охлаждении достаточно быстро сводится к минимуму. Это означает, что изменения деформации при постоянной разнице температур не зависят от нее.

Для измерения деформации можно задать температурный профиль. Из-за ограниченных градиентов реальный профиль может быть воспроизведен только с большими ограничениями. Это означает, что эффек-

ты деформации, которые, прежде всего, вызваны высокими градиентами, не могут быть обнаружены. По причине этих условий для практических измерений достаточно задать пиковую температуру, при этом следует ориентироваться на реальный температурный профиль.

Анализ результатов

На основе полученных оверлейных изображений проводится анализ измерений. Сначала вычисляется высота всех точек измерений на изображениях. Так как невозможно расположить измеряемый объект точно параллельно линейной решетке, методом наименьших квадратов в плоскость объекта помещается компенсационная плоскость, и все результаты измерения относятся к ней. Возможны и другие методы ориентации.

Таким образом, могут быть использованы различные методы представления и анализа полученных данных измерений деформации:

- трехмерное изображение;
- диагональные диаграммы;
- изображения высоты с помощью линий;
- расчет числовых параметров, таких как копланарность, изгиб (IPC-Twist), наклон (IPC-Bow), максимальных и минимальных значений.

Важная часть анализа — исключение возможных артефактов. В данном случае речь идет о тех частях оверлейных изображений, которые невозможно правильно интерпретировать, например недействительные изменения градаций серой шкалы. Главный источник подобного артефакта — неровности измеряемого объекта. Неправильная яркость освещения и оттенки также могут быть источниками артефактов.

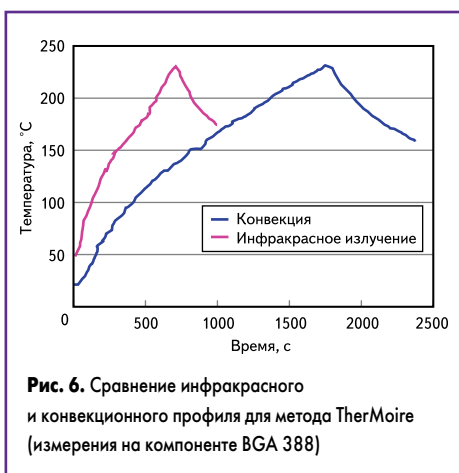


Рис. 6. Сравнение инфракрасного и конвекционного профиля для метода TherMoire (измерения на компоненте BGA 388)

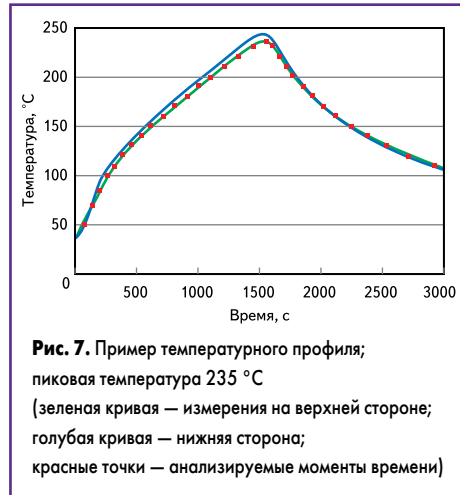


Рис. 7. Пример температурного профиля; пиковая температура 235 °C (зеленая кривая — измерения на верхней стороне; голубая кривая — нижняя сторона; красные точки — анализируемые моменты времени)

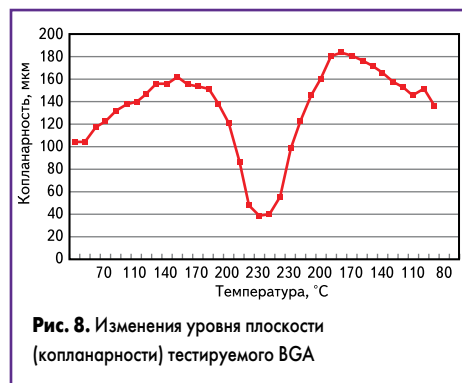


Рис. 8. Изменения уровня плоскости (копланарности) тестируемого BGA

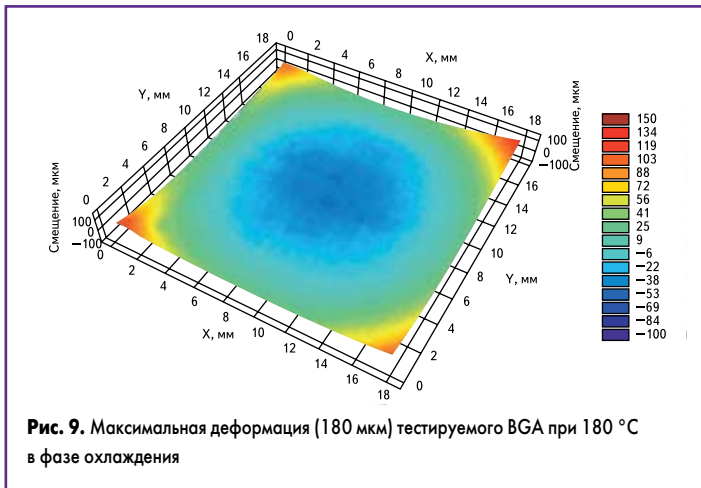


Рис. 9. Максимальная деформация (180 мкм) тестируемого BGA при 180 °C в фазе охлаждения

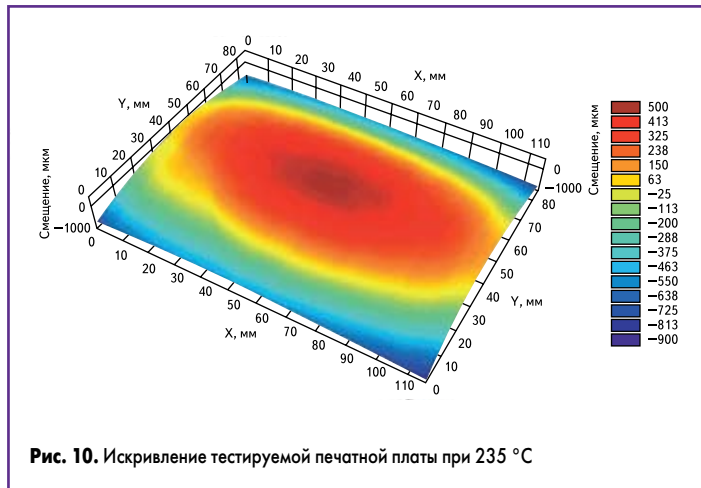


Рис. 10. Искривление тестируемой печатной платы при 235 °C

Артефакты проявляются в сильно искаженных и/или невычисляемых значениях высоты. Критическими для анализа представляются вычисленные, но сильно искаженные значения высоты. Хотя эти ошибки, как правило, хорошо видны на графиках, они в особенности фальсифицируют численные параметры (например, копланарность и т.д.), которые, соответственно, не могут быть далее использованы.

Еще один вариант анализа — вычисление деформации относительно какого-либо измерения (например, начального измерения, измерения при максимальной температуре). Это целесообразно, если измеряемый объект сам по себе сильно изогнут и изменения деформации, вызванные температурой, могут быть, таким образом, наложены.

Пример измерений

Последующие рисунки демонстрируют результаты измерений представленных в начале проблематичных компонентов BGA. На рис. 8 изображены изменения уровня плоскости исследуемой температурной области. Была зафиксирована разница копланарности около 140 мкм, особенно при охлаждении, из чего следует, что особенно в фазе кристаллизации появляются сильные вертикальные перемещения, которые могут повредить паяные соединения.

На самом деле для изменений уровня плоскости типично симметричное поведение

при нагревании и охлаждении. Причиной заметной асимметрии может быть разница температур между верхней и нижней стороной измеряемого объекта при нагревании и охлаждении (рис. 7). Хотя не существует окончательного доказательства подобному поведению, это не оказывает решающего влияния на данное измерение.



Рис. 11. Изменения уровня плоскости печатной платы с толстыми медными слоями

На рис. 9 хорошо видно, что особенно угловые шариковые контакты сильно выгибаются вверх. После кристаллизации паяные соединения подвергаются нагрузке вертикальными силами вследствие дальнейшей деформации компонентов BGA. Это соответствует описанному характеру повреждения. Итогом данного измерения стала смена поставщика компонентов.

Наряду с анализом SMT-компонентов возможно также измерение печатных плат.

На рис. 10 показана находящаяся в разработке печатная плата. Из-за плохих результатов измерений (макс. деформация 1,3 мм) были успешно внесены изменения в конструкцию печатных плат.

На рис. 11 и 12 представлены результаты измерений печатной платы без компонентов (проанализированная площадь — 120×120 мм²). На этой печатной плате находились толстые медные слои. Предполагалось, что распределение этих толстых медных слоев может привести к сильной деформации во время процесса пайки. Видно, что особенно в области температуры процесса пайки происходили сильные изменения деформации. Картина деформации усложняется тем, что эти изменения не распределены равномерно по всей анализируемой поверхности, а концентрируются с краю (на рис. 12 в правом верхнем углу). Вследствие чего была заново произведена разводка печатной платы.

Следующий пример анализа деформации печатных плат изображен на рис. 13. Для испытания объект был представлен в двух экземплярах. Во время измерений были обнаружены расслоения, которые возникли в температурной области между 235 и 240 °C и увеличивались вплоть до охлаждения до 235 °C. При измерениях первого экземпляра предполагалось, что печатная плата впитала слишком много влаги (хранение на открытом воздухе в течение двух дней), и тем самым объяснялось возникновение данных эффектов. Для того

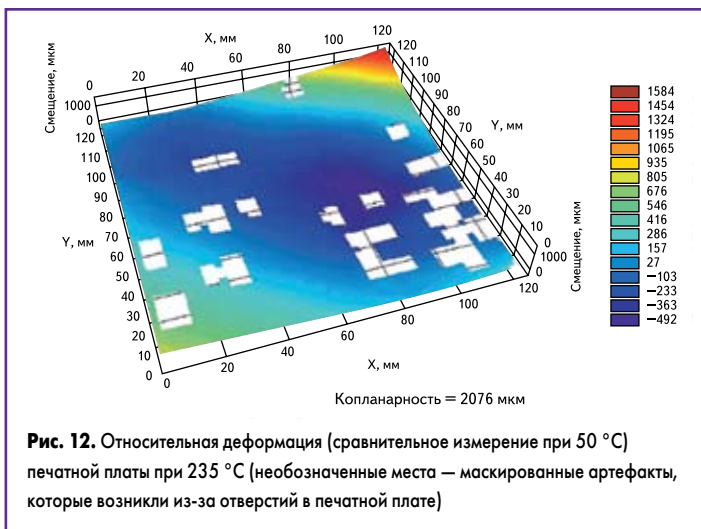


Рис. 12. Относительная деформация (сравнительное измерение при 50 °C) печатной платы при 235 °C (необозначенные места — маскированные артефакты, которые возникли из-за отверстий в печатной плате)

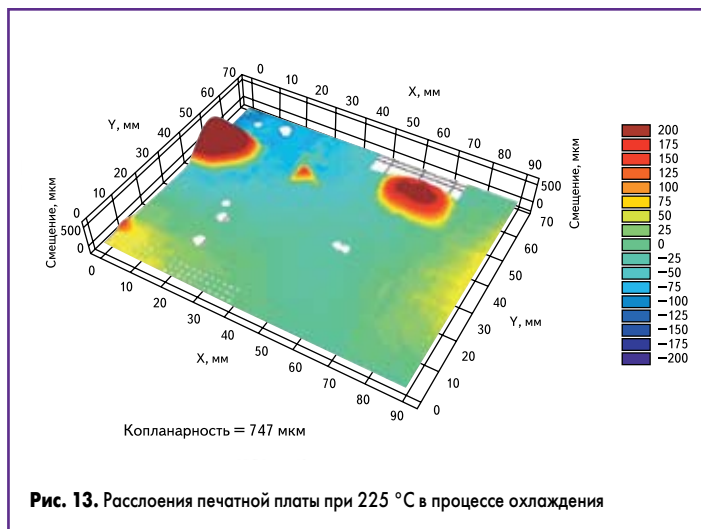


Рис. 13. Расслоения печатной платы при 225 °C в процессе охлаждения

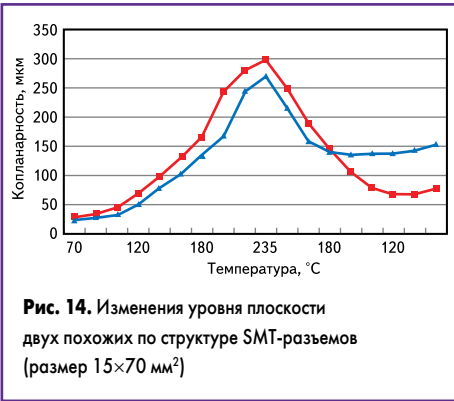


Рис. 14. Изменения уровня плоскости двух похожих по структуре SMT-разъемов (размер 15×70 мм²)

чтобы это исключить, второй экземпляр перед измерениями был подвергнут термообработке согласно предписаниям. Однако изменений не произошло. На похожей по структуре печатной плате другого производителя расслоений обнаружено не было.

С дальнейшим развитием технологий производства компонентов появляется все больше и больше вариантов и типов компонентов, таких, например, как разъемы. В до сих пор исследуемых компонентах рассматривались именно слоевые структуры. Подобные структуры в комбинации с используемыми материалами являются источником зафиксированных деформаций. Корпус разъема состоит, как правило, из однородного материала, так что в нем не может возникнуть существенных деформаций из-за различных коэффициентов температурного расширения. На рис. 14 представлены изменения уровня плоскости двух похожих по структуре разъемов, которые

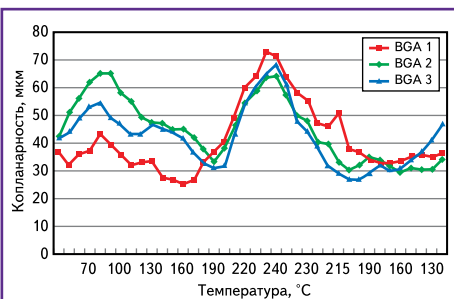


Рис. 16. Изменения уровня плоскости трех измеренных на одной плате компонентов BGA с изменением температуры

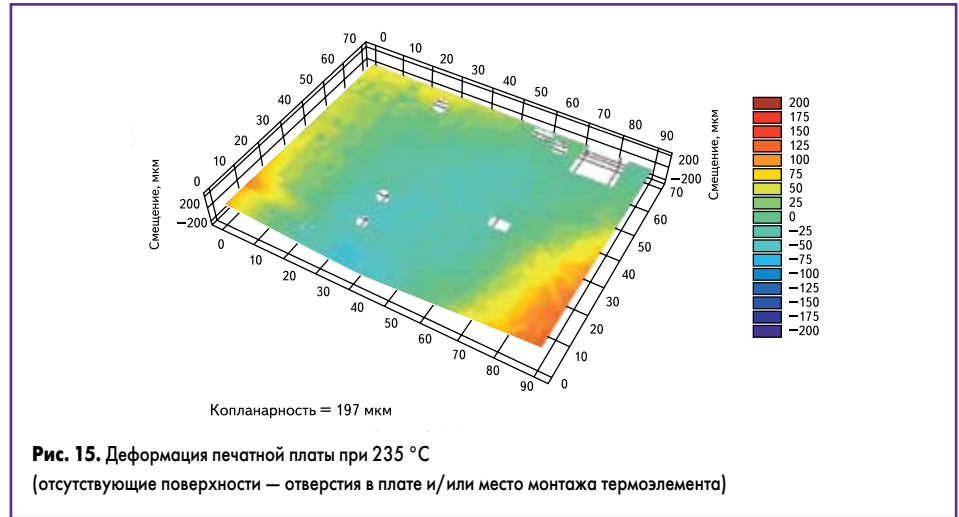


Рис. 15. Деформация печатной платы при 235 °С (отсутствующие поверхности — отверстия в плате и/или место монтажа термоэлемента)

достаточно сильно деформировались. Нужно заметить, что деформация осталась и после охлаждения.

Пример комплексного анализа

Дополнительный анализ, который был проведен впоследствии, необходим для того, чтобы можно было лучше провести оценку изображения повреждения. В этом случае также можно было частично увидеть трещины на компоненте BGA (размер 19×19 мм²). Для испытания в распоряжении находились некоторые электронные компоненты, а также две печатные платы. Сначала была измерена печатная плата на предмет ее деформации. Протестирована была только та часть печатной платы (размер 90×70 мм²), на которой проявлялись проблемы. Как видно на рис. 15, присутствуют деформации, которые не выходят за допустимые рамки (изгиб согласно IPC = 0,2). Необходимо отметить, что печатная плата выгибается вниз.

Далее были проанализированы компоненты BGA (4 компонента на одной плате). На рис. 16 представлены изменения уровня плоскости трех проанализированных компонентов BGA. Четко видно, что отдельные объекты ведут себя похожим образом. Наибольшие изменения происходят в температурной области самого процесса пайки. Изменения уровня плоскости компонентов BGA находятся

также в допустимых рамках (изгиб согласно IPC ≈ 0,4%). Необходимо снова заметить, что особенно внешние шариковые контакты движутся вниз по направлению к печатной плате, чтобы во время процесса охлаждения снова от нее удалиться. Это представлено на рис. 17 в форме диагонального изображения высоты компонентов BGA. Из-за этого вертикального движения внешние шариковые контакты получают дополнительные напряжения при растяжении.

Если теперь скомбинировать результаты измерений деформации компонентов BGA (вогнутых) и деформации печатной платы (выпуклой), то можно сделать вывод, что данные два элемента электронного модуля ведут себя при деформации противоположным образом, что увеличивает относительные движения в фазе пайки и тем самым усиливает механические напряжения.

На основе полученных результатов были проведены дополнительные измерения изначальных форм. В связи с этим на шести компонентах BGA был измерен профиль высоты нижней и верхней стороны. На рис. 18 изображены результаты одного компонента BGA. Остальные пять компонентов BGA продемонстрировали похожие результаты измерений. Масштаб изображения нижней стороны изменен таким образом, чтобы было возможно увидеть площадь субстрата. Расчет высоты шариковых контактов показал,

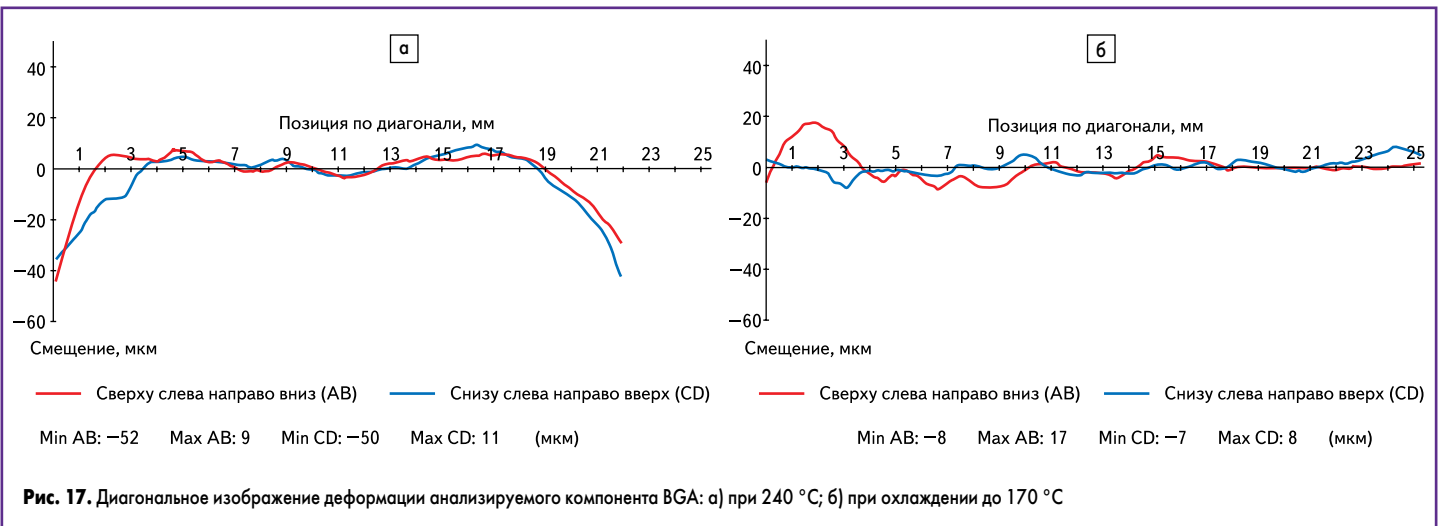
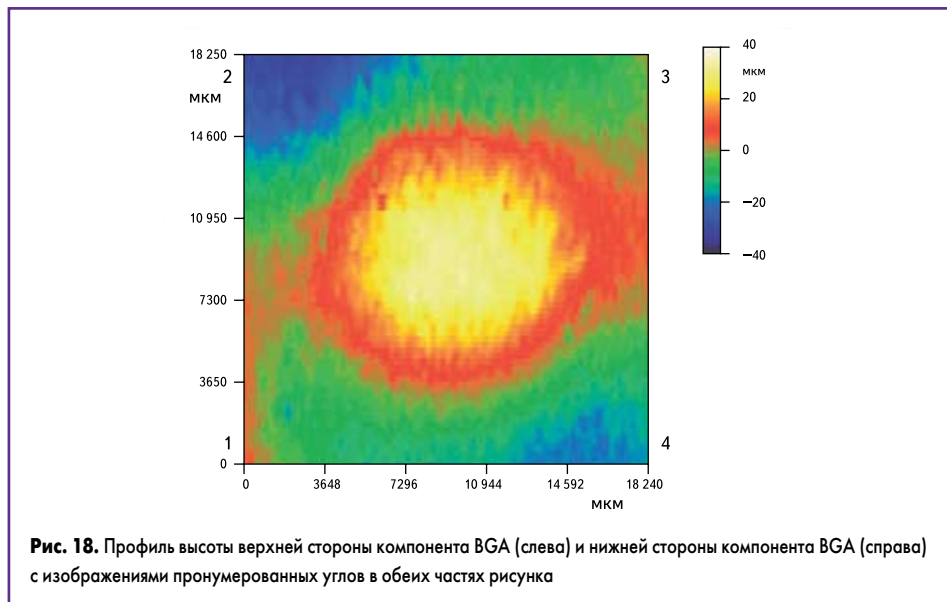


Рис. 17. Диагональное изображение деформации анализируемого компонента BGA: а) при 240 °С; б) при охлаждении до 170 °С



что эта высота хорошо соизмерима с данными измерений субстрата, так что высота шариковых контактов над ним может быть названа относительно постоянной. Во всех компонентах BGA внутренние шариковые контакты, если смотреть снизу, находятся ниже на 40–50 мкм. Далее при сравнении внешних шариковых контактов отмечается разница высоты между двумя диагоналями приблизительно в 15–20 мкм. Данные высоты верхней стороны соотносятся с данными нижней стороны.

Таким образом, в процессе монтажа внешние шариковые контакты опускаются в паяльную пасту глубже, чем внутренние шариковые контакты. Во время процесса пайки компонент BGA с внешними шариковыми контактами (с концентрацией на угловых шариковых контактах) выгибается вниз. Из-за различной изначальной формы это по-разному происходит на диагоналях. В целом это означает, что внутренние шариковые контакты приподняты по отношению к печатной плате. Это еще усиливается тем, что печатная плата сама незначительно выгибается в другую сторону. При неудачной комбинации отдельных характеристик это может привести к повреждениям электронного модуля.

Условия для проведения успешных измерений

Для успешного измерения методом TherMoire исследуемые объекты должны быть соответствующе подготовлены. Данная подготовка особенно касается анализируемого изображения муара, причем названные артефакты должны быть минимизированы и/или исключены.

К подготовке относятся:

- По возможности белая и диффузно отражающая поверхность, которая может быть реализована при помощи нанесения температуростойкой краски.
- Гладкая поверхность (неровности ведут к невозможности проанализировать изображение); присутствующие неровности должны

быть выровнены, например, с помощью фольги.

- Небольшие неровные поверхности могут быть исключены из анализа путем маскирования.
- Следующие объекты могут быть протестированы методом TherMoire:
- SMT-компоненты (корпус);
 - печатные платы без компонентов (максимальный размер 15×15 см²);
 - солнечные батареи;
 - SMT-разъемы, SMT-реле и SMT-трансформаторы¹;
 - другие объекты после предварительного визуального анализа.

Заключение

Представленные измерения являются примерами из ряда исследований. При этом наряду с проблематичными случаями присутствуют также исследования, которые не были особенно отмечены. Также необходимо отметить, что такие измерения проводятся в большинстве случаев тогда, когда предполагаются проблемы. Нужно учитывать, что повреждения чаще всего возникают в комбинации с другими эффектами.

Измерения деформации при температурной нагрузке могут послужить улучшению качества изготавливаемых электронных модулей. Решение проявившихся проблем может быть найдено лишь в тесном сотрудничестве с изготовителем исследуемых объектов.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2009. № 1. Германия).

Литература

1. Pan J., Curry R., Hubble N., Zwerner D. Comparing Techniques for Temperature-Dependent Warpage Measurement // PLUS. 2007. No 10.

¹ Могут быть протестированы после специальной подготовки (фольги), причем, как правило, в данном случае возможен лишь относительный анализ.