Говорит и показывает ультразвук: метод акустической микроскопии

ВАЛЕРИЯ УТГОФ, v.utgof@dipaul.ru

Оценка качества электронных устройств становится все более трудоемкой задачей в связи с усложнением многослойной структуры интегральных схем, увеличением их эффективности и одновременным уменьшением размеров. В связи с этим как никогда повышается важность надежных методов контроля качества и анализа неисправностей электронных изделий.

Одним из широко распространенных методов неразрушающего контроля является сканирующая акустическая микроскопия. Данная технология позволяет при помощи акустических волн получать изображения микроскопических объектов и быстро проводить анализ на наличие возможных скрытых дефектов, не разрушая структуру образца.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Метод акустической микроскопии основан на том, что любой материал обладает собственным акустическим сопротивлением. Удельное акустическое сопротивление – величина, показывающая сопротивление материала при смещении частиц материала под воздействием звуковой волны, определяется как произведение плотности материала на скорость звука в нем:

$$Z = \rho \cdot c$$

где Z – удельное акустическое сопротивление; ρ – плотность материала; c – скорость звука в материале.

Граница раздела между двумя материалами с различным удельным акустическим сопротивлением называется акустическим интерфейсом. При попадании звукового импульса в акустический интерфейс часть звуковой энергии отражается, а часть – проходит сквозь границу раздела. Потери энергии между материалом 1 и материалом 2 рассчитываются по формуле:

$$dB_{loss} = 10\lg\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

где Z_1 – удельное акустическое сопротивление материала 1; Z_2 – удельное акустическое сопротивление материала 2.

Чем больше разница сопротивлений акустического интерфейса, тем больше амплитуда отклика звукового сигнала и тем выше контраст изображения. Именно это свойство делает метод акустической микроскопии наиболее предпочтительным для обнаружения пустот, трещин и расслоений в материале, поскольку разница акустических сопротивлений на границе «твердый материал – воздушная полость» настолько велика, что в этих областях акустический сигнал полностью

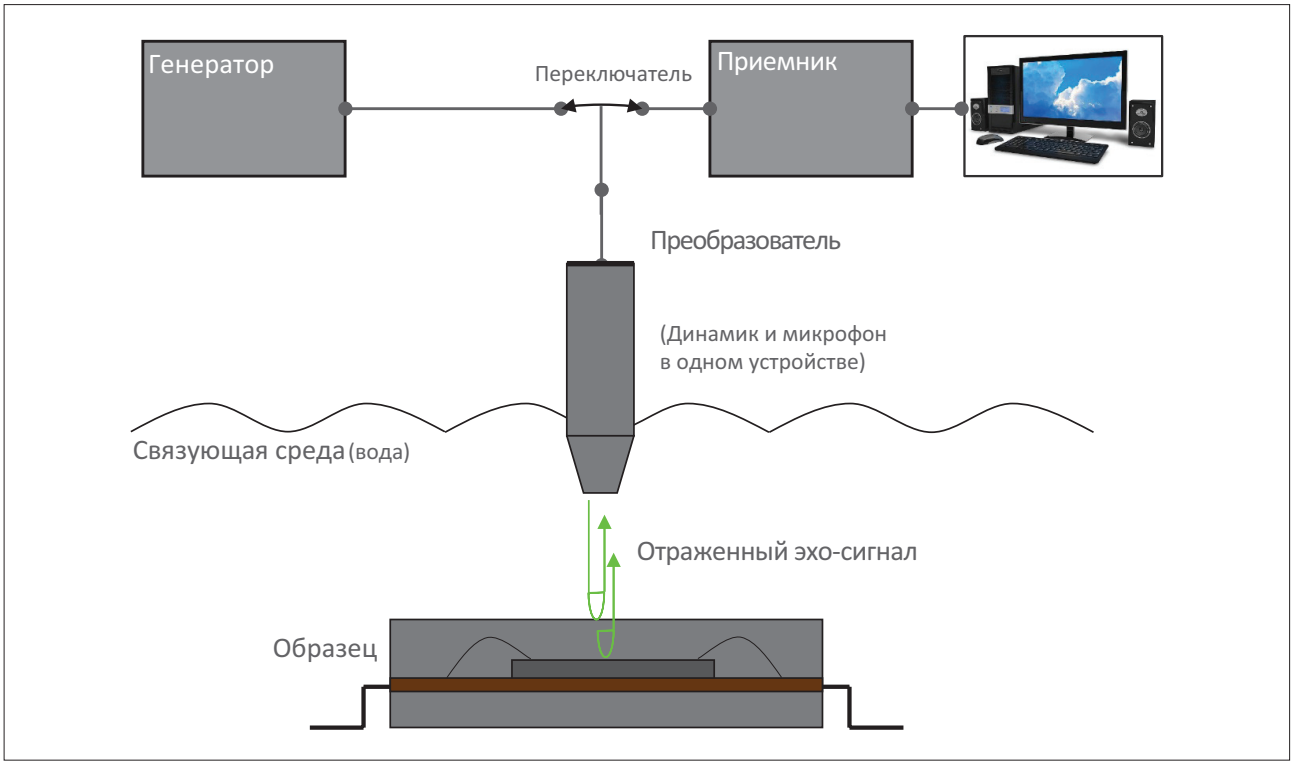

Рис. 1. **Схема работы ультразвукового микроскопа**

отражается. В результате полость в материале отчетливо видна по контрастности изображения.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА

Стандартная конструкция ультразвукового микроскопа (см. рис. 1) состоит из генератора импульсов, преобразователя, который объединяет функции динамика и микрофона, а также приемника.

Акустический микроскоп работает в импульсном режиме. Электрический сигнал от генератора попадает на пьезоэлектрический преобразователь, который преобразует электрический сигнал в акустические волны. Для частот ниже 100 МГц используются кристаллы ниобата лития, кварца или керамики. Если частоты выше этого предела, применяются пьезоэлектрические кристаллы, например оксид цинка (ZnO). Далее акустический сигнал посылается через сапфировый цилиндр в фокусирующие линзы, после чего акустическое поле фокусируется на оси объектива в связующей среде (вода). Связующая среда проводит акустические импульсы от объектива к образцу.

После взаимодействия акустического поля с образцом система работает в обратном порядке: отраженный сигнал проводится связующей средой, затем попадает в линзу, преобразуется в плоское поле, а потом с помощью пьезоэлектрических преобразователей генерируется ответный сигнал. Акустический сигнал преобразуется в электрический, попадает в приемник и далее в компьютерную систему, в которой происходит дальнейший анализ и преобразование полученных данных. В результате имеющиеся данные отображаются системой на экране в виде пикселей с различной насыщенностью серого цвета.

Диапазоны частот акустических микроскопов, как правило, делятся следующим образом: низкие частоты 1–100 МГц, средний диапазон частот 100–400 МГц и высокочастотный диапазон 400 МГц – 2 ГГц. Обычно исследования на низких частотах позволяют проводить исследования вглубь образца, тогда как средние и высокие частоты используются для исследования поверхности и приповерхностной области. Кроме того, в зависимости от поставленных задач могут быть использованы различные преобразователи.

Акустическая микроскопия позволяет делать различные срезы исследуемого образца, не разрушая его. Так, можно выполнить B-сканирование, что по сути представляет собой поперечное сечение образца, или C-сканирование,

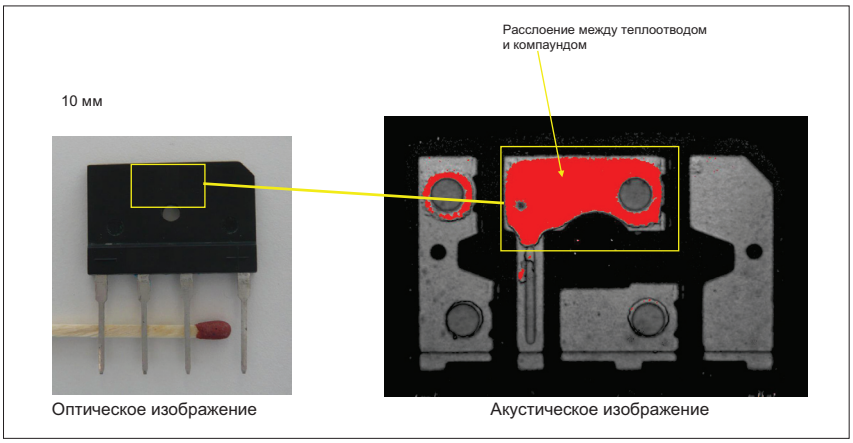

Рис. 2. **Корпус ИС**

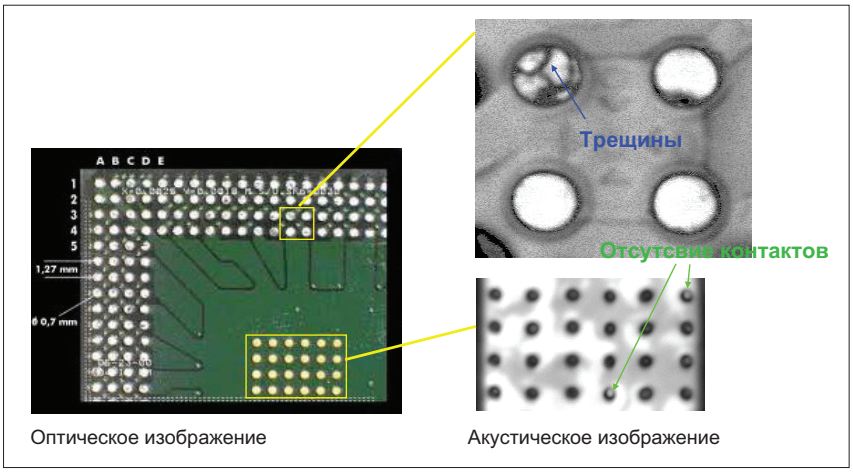

Рис. 3. **Трещины в бампах**

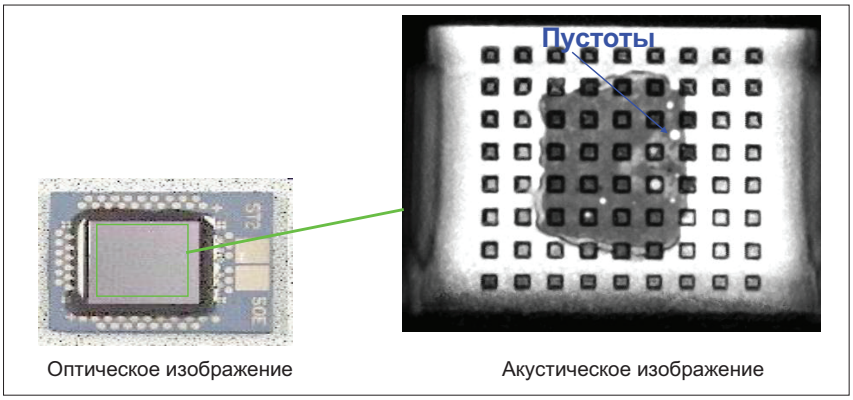

Рис. 4. **Пустоты в соединении кристалла**

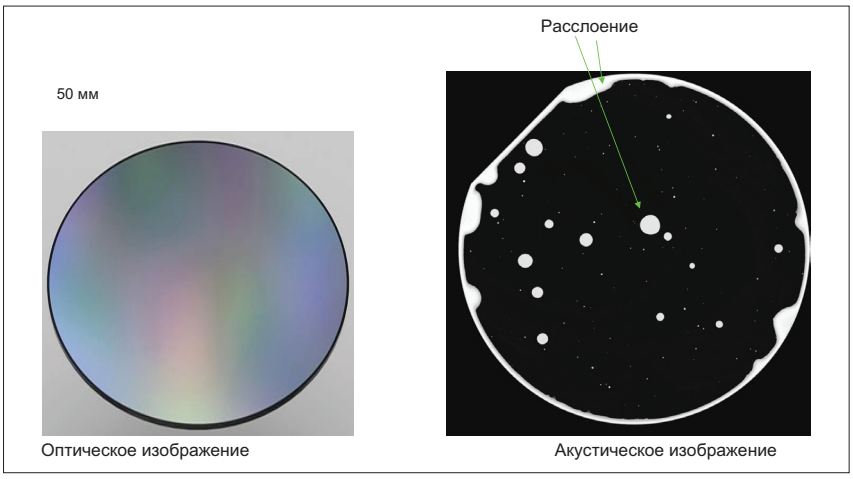

Рис. 5. **Расслоения при склеивании полупроводниковых пластин**

Рис. 6. **Ультразвуковой микроскоп KSI V8**

Рис. 7. **Ультразвуковой микроскоп KSI V8 Advanced**

в результате которого можно получить изображение внутреннего слоя образца. Кроме того, существуют и другие типы сканирования, такие как G- и X-сканирование, предоставляющие неразрушающие срезы нескольких слоев образца, что в свою очередь дает представление о глубине дефекта и его расположении внутри образца.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В каких же областях может быть полезна данная технология? Благодаря физическому принципу действия данный метод является универсальным для неразрушающего контроля, и область применения вовсе не ограничивается производством электронных и микроэлектронных устройств, а распространяется гораздо шире и включает такие производственные сферы, как фотовольтаика, автомобилестроение, материаловедение, биотехнология и фармацевтика. Метод позволяет обнаружить, визуализировать и проанализировать трещины, дефекты, включения и расслоения в совершенно различных материалах, что делает его универсальным для применения во многих областях науки и техники.

Возвращаясь к производству электроники и микроэлектронных устройств, можно отметить, что акустическая микроскопия служит прекрасным инструментом для исследования полупроводниковых пластин, кристаллов, корпусов интегральных схем, многослойных устройств по типу flip chip, chip-on-board и chip-on-flex и т.д. (см. рис. 2). Метод успешно справляется с обнаружением таких дефектов, как пустоты в соединении кристаллов, трещины в материале корпуса, пустоты в компаунде, микротрещины полупроводниковых пластин, пустоты в BGA-соединении и многие другие производственные дефекты, в основе которых имеет место переход «твердый материал – воздушная полость», о чем говорилось ранее (см. рис. 3–5). Также метод позволяет выявлять и отбраковывать контрафактные изделия путем обнаружения на них следов перемаркировки.

ЛИНЕЙКА ОБОРУДОВАНИЯ КОМПАНИИ KSI

Немецкая компания KSI (Kraemer Sonic Industries, основана в 1989 году) – один из лидеров в области акустической микроскопии, в течение многих лет использует данную технологию для неразрушающего контроля и анализа как в области микроэлектроники и полупроводниковых материалов, так и во многих других производственных сферах. Компания имеет богатый опыт в разработке как типовых лаборатор-

ных и производственных решений, так и сложных систем для серийных производств, включая акустические микроскопы, встраиваемые в технологическую линию, со специально разработанным программным обеспечением, позволяющим максимально автоматизировать процесс. Микроскопы, изготовленные компанией KSI, устроены по принципу Plug and Play, а значит, не требуют ничего, кроме подключения к розетке и выделенного пространства в помещении.

На данный момент наиболее передовым поколением микроскопов является линейка серии V. Для моделей этой серии характерна высокая скорость сканирования, которая обеспечивается за счет аппаратной части системы, а также разработанных и запатентованных компанией KSI FCT-преобразователей (fluid cut technology – «технология разрезания воды»), позволяющих сократить время сканирования на 30% по сравнению с обычными преобразователями.

Базовым решением для проведения акустической микроскопии является модель микроскопа V8 (см. рис. 6). Эта машина представляет собой универсальный инструмент, который объединяет все опции, необходимые для проведения анализа на наивысшем уровне. Благодаря сочетанию высококачественного изображения и высокой скорости сканирования данная модель является оптимальным решением как для научных исследований, так и для серийных производств. V8 обладает широким полем сканирования 400×400 мм и дает возможность работы с преобразователями в частотном диапазоне 5–400 МГц. Благодаря модульному исполнению микроскоп может быть оборудован под конкретные нужды заказчика.

Микроскоп модели V300 имеет те же преимущества и конструкционные особенности, что и V8, за исключением уменьшенного диапазона возможных используемых преобразователей (рабочий диапазон 5–300 МГц), а также уменьшенным максимальным полем сканирования – 300×300 мм. Таким образом, при отсутствии у заказчика жестких требований по этим двум параметрам машина становится бюджетным решением для лабораторий и производств.

Новейшая разработка компании KSI – микроскоп модели V8 Advanced (см. рис. 7). Вобрав все преимущества предыдущих моделей серии V, данный микроскоп дополнен самыми передовыми функциями технологии акустической микроскопии, такими как держатель преобразователей револьверного типа, камера высокой четкости с CMOS-матрицей, обеспечивающая высокоточное позиционирование преобразователя над образцом, системы контроля температуры и качества воды, и многое другое.

В настоящее время сканирующая акустическая микроскопия является передовым методом неразрушающего контроля, позволяющим быстро получать качественную оценку внутренней структуры изделий. Модульность и вариативность конструкции и программного обеспечения, возможность проведения поверхностных и объемных исследований с высоким разрешением делает акустические микроскопы превосходным инструментом для решения широкого спектра задач как в исследовательских областях, так и на производстве.