



# Совместное использование рентгеновской и УЗ-технологий в микроэлектронике

*Ключевые слова: внутренние дефекты, глубина проникновения, рентгеновские лучи, топологические элементы, ультразвук.*

*Вопросы контроля качества всегда были важны для изготовителей изделий микроэлектроники. Существуют два метода – разрушающий и неразрушающий. Первый основан главным образом на выборочном подходе к партии изделий, а второй позволяет осуществлять поточный контроль, снижая потери на тестирование и выявляя дефекты во всех изделиях партии. Специалисты корпорации Nordson SONOSCAN (г. Элк-Гров-Виллидж, шт. Иллинойс, США), в частности, считают, что наилучшие результаты дает совместное использование рентгеновской и ультразвуковой технологий.*

Рентгеновское и ультразвуковое излучения известны способностью отображать внутренние особенности (включая структурные дефекты) твердых объектов без их разрушения или повреждения. Эти технологии также хорошо дополняют друг друга: когда внутренняя структура определенного типа в определенном материале по каким-либо причинам не может быть обнаружена одной из них, очень часто это способна осуществить другая. Рентгеновские лучи – часть электромагнитного спектра, у них более короткие длины волн, чем у видимого излучения (хотя и не такие короткие, как у гамма-излучения). Более короткая длина волны соответствует более высоким частоте и энергии. Рентгеновские лучи не отражаются от поверхности твердых материалов, за исключением очень низких наклонных углов падения. Существующие немногочисленные промышленные применения для отражательного рентгеновского излучения обычно не доступны на открытом рынке.

УЗ- и рентгеновское излучения в разной степени ослабляются материалом, через который проходят. Рентгеновские изображения обычно отображают внутреннюю структуру за счет локальных различий в яркости проходящего сквозь нее луча (формирование контрастного изображения поглощением). Проникновение излучения в материал регулируется путем изменения напряжения тока в рентгеновской системе. Пространственное разрешение очень высокое: рентгеновское излучение позволяет различить топологические размеры элементов в субмикронном диапазоне, хотя окончательное разрешение зависит от детектора и фокусной глубины источника излучения.

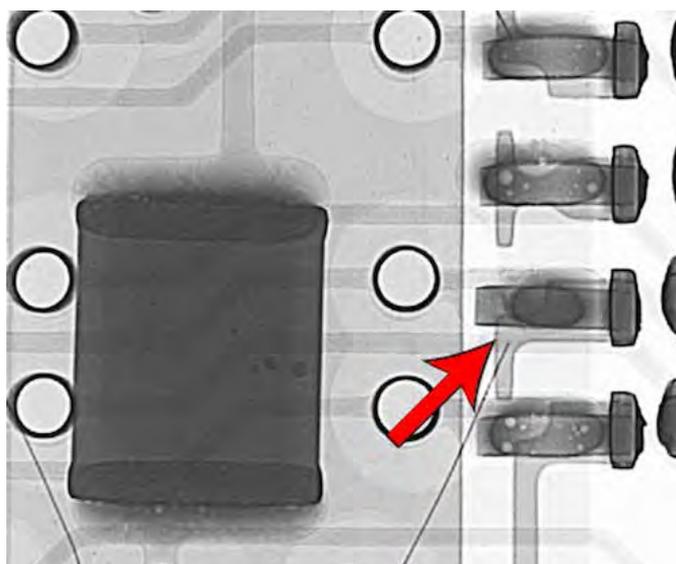
Ультразвук не является частью электромагнитного спектра – это механическая энергия. Он проникает сквозь твердые материалы гораздо медленнее рентгеновских лучей. Скорость составляет от нескольких тысяч метров в секунду до 18 тыс. м/с (в случае алмаза). Частота ультразвукового формирования изо-

бражений в промышленных применениях колеблется в диапазоне от 5 до 40 МГц. Скорость проникновения в конкретный материал зависит от упругих свойств материала. В материалах с высокой упругостью, таких как резина, получить изображение можно только на очень низких частотах – несколько мегагерц или даже меньше (в зависимости от толщины образца). Если же предметом исследования становятся материалы с низкими свойствами упругости (кремний и алмаз), могут использоваться частоты порядка 400 МГц. Для большинства материалов, применяемых в электронной промышленности, используются частоты в диапазоне 30–230 МГц. Ультразвук отражается всеми границами раздела между материалами и частично пропускается многими из этих границ. В отличие от рентгеновского излучения, УЗ-излучение не передается по воздуху, граница раздела твердого материала и воздуха приводит к почти 100%-ному отражению.

На рис. 1 показано рентгеновское изображение одного из восьми приборов полоски памяти. Данное изображение было получено

системой Nordson DAGE Quadra 7 с целью выявления внутренних дефектов, которые могут вызвать повреждение электрической сети в период эксплуатации. На рисунке показаны все топологические элементы от верхней части пластикового корпуса прибора до нижней части платы, на которую прибор смонтирован. Круглые топологические элементы – отверстия в плате, а бледно-серые горизонтальные линии – это межсоединения на плате. Напряжение тестирования составило 110 кВ, а мощность – 7 Вт. Применялись фильтр резкости и контрастный фильтр.

Большой вертикальный серый топологический элемент – это пластиковый корпус. Кремниевый кристалл внутри корпуса не виден, потому что рентгеновское излучение в нем слегка затухает. Однако его положение может быть определено из разводки, входящей в корпус. Более темный прямоугольник в нижней половине площадки кристалла – это конденсатор на обратной стороне платы. Здесь нет обрывов разводки или других очевидных дефектов, но есть овальная область в соединении одного вывода с контактной площадкой



Источник: Nordson SONOSCAN

*Рисунок 1. Стрелка указывает на anomalно темный участок между выводом и контактной площадкой на полоске памяти*



справа (показано стрелкой). Это соединение несколько темнее, чем другие.

Данный топологический элемент показан при более высоком увеличении в центре рис. 2. Темная овальная капля в центре соединения – это припой, не распространившийся должным образом и не смочивший две поверхности (вывод из кристалла и контактная площадка, связывающая прибор с ПК). Его большая толщина относительно припоев окружающих соединений вызывает большее затухание рентгеновского излучения, что и обуславливает более темный цвет. Отсутствие должного смачивания означает, что связь между выводом и контактной площадкой плохая или же вообще отсутствует.

На контактной площадке ниже припой смочил большую часть желаемой площади контакта – виден более крупный и лучше пропускающий излучение овал. В процессе пайки в припое образовалось несколько пузырьков воздуха. Если пузырьки не составляют более 40% желаемого объема припоя, соединение вряд ли будет нарушено. В других близлежа-

щих соединениях достигнуто удовлетворительное смачивание, хотя в некоторых также имеются пузырьки воздуха.

Те же самые топологические элементы можно увидеть, формируя изображение компонента под углом, как показано на рис. 3. Локальное расстояние прохождения излучения сквозь топологические элементы при изучении под углом изменилось. Дефектное соединение сверху представляется овалом варьирующейся темноты, пустоты (пузырьки) в соединении ниже по-прежнему хорошо видны.

Изображение той же самой полосы памяти было затем сформировано инструментальным средством Nordson SONOSCAN C-SAM с использованием ультразвукового метода визуализации C-mode (фирменная технология корпорации Nordson SONOSCAN). При этом использовался 120-ГГц преобразователь. Управление пропусканием каждого отраженного сигнала импульса осуществлялось на глубину чуть ниже верхней поверхности пластикового корпуса и до нижней части кристалла. Управление пропусканием обеспечивало

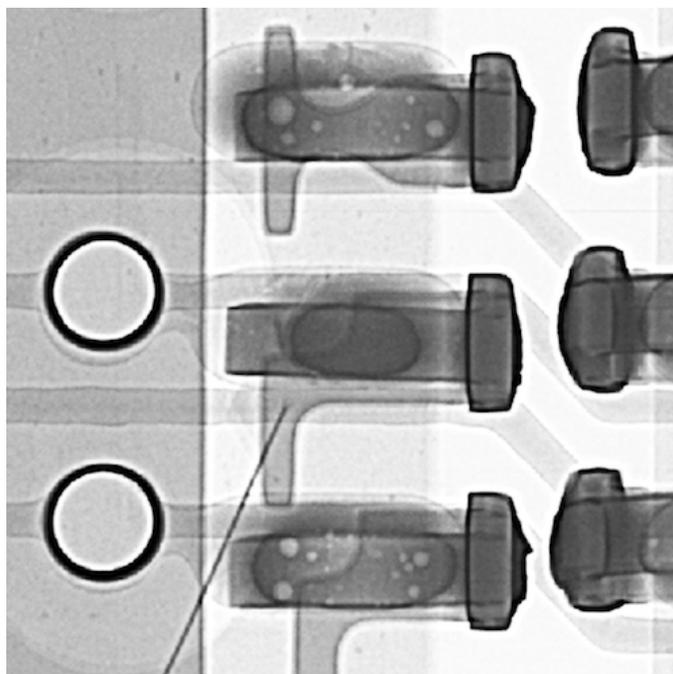
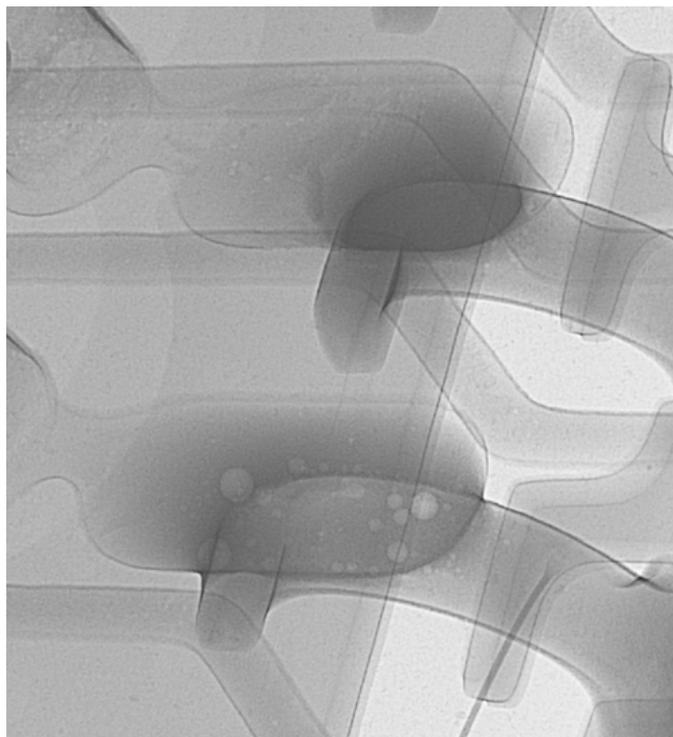


Рисунок 2. Увеличенное изображение показывает, что припой не смочил поверхности вывода и контактной площадки



Источник: Nordson SONOSCAN



*Рисунок 3. Угловой рентгеновский снимок демонстрирует дефектный припой, а также изменившееся расстояние прохождения излучения через наклоненный под углом вывод*

определенный диапазон глубины, в котором использовались эхосигналы, возвращавшиеся с границ разделов и формировавшие таким образом акустическое изображение. Отраженные сигналы за пределом этого диапазона игнорировались. Благодаря этому удалось избежать путаницы при определении глубины конкретного топологического элемента.

Изображение полосы памяти, полученное акустически, показано на рис. 4. Благодаря тому, что из диапазона пропускания были ис-

ключены верхняя поверхность корпуса и посадка кристалла, единственный ожидаемый в данном диапазоне эхосигнал возникает на границе раздела между формовочным компаундом и поверхностью кристалла. В семи приборах граница раздела кажется серой. Это указывает на наличие эхосигнала малой амплитуды, отразившегося от границы раздела между двумя твердыми материалами. Серые области несколько пятнисты, возможно, из-за неоднородностей формовочного компаунда.

Источник: Nordson SONOSCAN



*Рисунок 4. Акустически сформированное изображение полосы памяти из восьми приборов с использованием излучения 120 ГГц*



Но на изображении второго прибора (рис. 5) большая часть площади кристалла – красного цвета, что показывает почти полное отражение поступающего импульса. Когда для идентификации объектов используются псевдоцвета, красный часто выбирается для идентификации границы раздела между твердым материалом и газом (обычно воздухом). То, что здесь демонстрируется, – это отслоение формовочного компаунда от поверхности кристалла на большей части его площади, в результате чего получается тонкий воздушный зазор. В первоначальном монохромном изображении эта область будет ярко-белой, в то время как области, не отражающие ультразвук, – черными, а границы раздела между двумя твердыми материалами будут иметь некоторый оттенок серого.

Даже малое отслаивание от поверхности кристалла может расширяться во время эксплуатации, привести к отходу разводки от контактов и нарушению электрической цепи. Отслаивание на большей площади, как

показано, способно вызвать перегрев и выход из строя всего кристалла – в зависимости от предполагаемого рассеяния мощности прибора.

Затем полоса памяти была отображена неразрушающим методом, известным как Q-BAM (режим количественного анализа при помощи B-сканирования – B-scan). Он позволяет получить изображение поперечного сечения через выбранную вертикальную плоскость, которая по размерам совпадает с оптической фотографией разрушающего секционирования через ту же самую вертикальную плоскость.

Для получения Q-BAM-изображения образец сначала визуализируется методом C-mode, чтобы выбрать вертикальную плоскость, через которую будет неразрушающим образом формироваться изображение. Поэтому рис. 4 повторяется в нижней части рис. 6. Белая линия, горизонтально проходящая через полосу памяти, определяет вертикальную плоскость, по которой полоска памяти будет секционирована неразрушающим образом.

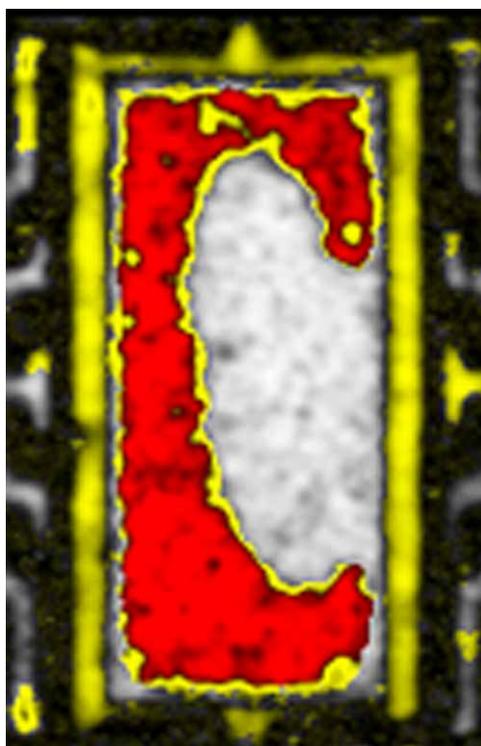


Рисунок 5. Отслоение формовочного компаунда от кристалла на большей части его поверхности

Верхняя часть изображения на рис. 6, полученного неразрушающим методом, была создана путем управления диапазоном пропускания на очень малой глубине. При первом проходе вдоль белой линии датчик воспринимал для визуализации только эхосигнал, возникавший в нижней точке исследуемой области. Затем датчик переходил на следующий малый диапазон и вновь сканировал образец. Возвратно-поступательное сканирование длилось до тех пор, пока не была достигнута поверхность и не завершено неразрушающее формирование поперечного сечения.

Поперечное сечение отражено в верхней части рис. 6. Шкала в левом верхнем углу показывает простираение в глубину поперечного сечения на 10 сегментов. Жирные красные топологические элементы чуть выше и чуть ниже верхней части формовочного компаунда – это эхосигнал от границы раздела формовочного компаунда с другими элементами, а многочисленные мелкие элементы, создающие впечатление дождя, – просто неоднородности формовочного компаунда, а не пустоты или другие дефекты.

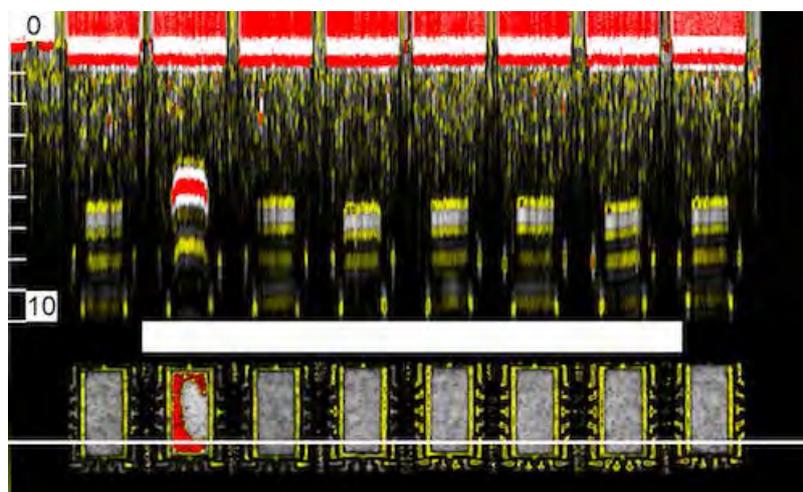
Изображение, полученное в режиме Q-BAM, показывает, что прибор, имеющий отслоение формовочного компаунда от кристалла, пока-

занное в C-mode красным цветом, сильно изогнут. Куполообразный профиль выглядит точно так же, как если бы прибор был физически секционирован.

Существуют и другие варианты использования различия рентгеновской и УЗ-технологии. Так, ультразвук может определять глубину внутреннего пространства топологического элемента непосредственно путем измерения времени прохождения отраженного эхосигнала. Если образец для формирования изображения возможно перевернуть на бок, то глубина топологического элемента, видимого сверху, может быть измерена непосредственно.

В случае использования рентгеновской технологии глубина формируемого изображения может быть увеличена за счет увеличения напряжения тока. Если же используется УЗ-технология, глубину формируемого изображения можно увеличить за счет снижения частоты. В обоих случаях яркость регулируется только после формирования изображения.

Попадая на воздушный зазор, ультразвук отражается почти полностью, как очень сильный эхосигнал, даже если это зазор субмикронной толщины. Рентгеновское излучение не отражается вообще, но из-за достаточно заметного затухания воздушный зазор будет



Источник: Nordson SONOSCAN

Рисунок 6. Поперечное сечение прибора, полученное неразрушающим УЗ-методом



## МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Представленная технология, позволяющая проводить анализ структур без вскрытия изделия, в целом интересна. Однако акустическое исследование микросхем не очень информативно, а применение рентгеновского томографа занимает сравнительно много времени. Полагаю, технология будет применима для выборочного контроля наиболее критичных блоков, так как в сплошном контроле массового производства (от 5–7 тысяч изделий в сутки) она будет неэффективной: для обеспечения точечной проверки всей поверхности каждого изделия нужно будет поставить сотни установок. Кроме того, сплошные массовые проверки займут много времени: сканирование по глубине (G-скан) небольшого участка изделия занимает от 30 минут до нескольких часов, а еще добавится время на загрузку, позиционирование, сканирование и выгрузку изделий.

В отличие от рентгеновского микроскопа, который позволяет «заглянуть» на субмикронный уровень, рентгеновский томограф из-за более высокой интенсивности полезного излучения предназначен для съемки более крупных объектов на большей площади. Заявленной же в статье мощности излучения (7 Вт) вряд ли хватит для формирования волны, достаточной для проведения исследований на субмикронном уровне, или же время сканирования будет чрезвычайно длительным (full night).

Что касается ультразвукового воздействия, то оно по определению не может быть



неразрушающим, так как оно механическое. Характер и масштабы разрушений будут зависеть от мощности и длительности излучения, а также структуры вещества, на которое оказывается воздействие. Для получения неискаженных результатов ультразвуковое сканирование в воздушной среде должно проводиться в изолированном от внешних воздействий помещении (аналог антишумовой комнаты), а при сканировании в жидкой среде – в антивибрационном, что тоже добавит сложностей при организации контроля в массовом производстве.

*Александр Чамов, главный специалист  
отдела электронных измерений  
АО «НИИМЭ»*

отображаться достаточно толстым (и темным).

При помощи обеих технологий можно формировать 3D-изображения. Рентгеновские

установки собирают полный набор данных путем сканирования образца с различных углов и затем формируют изображение с использованием программного обеспечения.



УЗ-установки выполняют плоское сканирование, управляя пропусканием с очень малой глубиной сканирования. На основе этих данных и создается 3D-изображение.

Есть еще несколько вариантов совместного применения данных технологий. Ценность подхода заключается в том, что внутренним структурным аномалиям будет негде спрятаться.



*Davis Shannon. X-ray and Ultrasound Pinpoint Structural Defects in Microelectronic Components. Semiconductor Digest, August 16, 2019: <https://www.semiconductor-digest.com/2019/08/16/x-ray-and-ultrasound-pinpoint-structural-defects-in-microelectronic-components/>*