

Использование последних технологических достижений для рентгеновского контроля электронных изделий

Давид Бернارد
(David Bernard)

david.bernard@nordsondage.com

Кейт Брайнт
(Keith Bryant)

keith.bryant@nordsondage.com

Перевод: Ольга Зотова

Введение

Технологии, которые в настоящее время используются для проверки и анализа неисправностей в большинстве систем рентгеновского контроля в электронном производстве, существуют давно и почти все заимствованы из медицины. Но поскольку для медицинских целей продается намного больше рентгеновских систем, чем для проверки электронных изделий, то потребности электронной промышленности рассматриваются производителями такого оборудования как второстепенные. Поэтому приходится выбирать компромиссные решения, которые, как правило, не позволяют достигать оптимальных параметров контроля электронных изделий.

Например, обычно разрешение детектора изображения составляет 1 Мпиксель (1000×1000 пикселей), что вполне приемлемо для медицинских целей, поэтому производители детекторов мало заинтересованы в увеличении этого значения. Кроме того, как это будет показано ниже, качественное изменение таких характеристик приводит к существенному увеличению стоимости установки.

И только в последнее время появились действительно уникальные разработки новых технологий специально для электронной промышленности (для относительно малого сектора рынка). В частности, следует отметить прогресс в области технологий рентгеновских трубок и детекторов, благодаря чему современные системы рентгеновского контроля лучше оптимизированы для электронного производства, а также готовы для решения более сложных задач в будущем. В качестве примера можно привести переход на межсоединения внутри корпусов полупроводниковых изделий, выполненные из медных проводников, которые имеют существенно меньшую плотность для рентгеновских лучей по сравнению с золотыми проводниками, а также внедрение в производство элементов крайне малого размера, таких как сквозные межслойные соединения кремниевых кристаллов (технология Through Silicon Via, TSV) и столбиковые выводы из припоя.

Усовершенствования, которые новые технологии обеспечивают для рентгеновского контроля электронных изделий, будут рассмотрены в сравнении с существующими технологиями.

Преимущества рентгеновского детектора

Увидеть или как-либо измерить собственно рентгеновские лучи невозможно. Необходимо, чтобы рентгеновские лучи воздействовали на какой-то промежуточный материал, состояние которого затем можно будет проанализировать и составить изображение. Вот почему изначально единственный способ получения изображения предусматривал использование чувствительной к рентгеновскому излучению пленки. Но накладные расходы, реактивы и время, необходимое для проявки пленки, — все это не очень подходит для проверки электронных изделий в режиме реального времени. К тому же используемые в системах рентгеновского контроля для электронной промышленности детекторы, как и трубки, изначально разрабатывались для медицины. Поэтому исторически применяемые для работы с электроникой детекторы были разработаны не для той задачи, для которой они стали использоваться. Это связано с тем, что спрос на более крупном по размерам медицинском рынке привел к снижению стоимости детекторов и для менее крупного рынка электроники, но при этом пришлось пожертвовать некоторыми возможностями оптимизации для работы именно с электронными изделиями.

Это значит, что для проверки электроники использовались либо усилители изображения (УИ, рис. 1), либо плоскочувствительные детекторы из аморфного кремния (ППД из АК). Детектор закреплен в опорном механизме, который позволяет проводить рентгеновский контроль под косым углом без потери увеличения образца. Однако недавно появились плоскочувствительные детекторы нового типа, разработанные специально для инспекции электронных изделий. Эти детекторы отличаются от детекторов из аморфного кремния и называются плоскочувствительными детекторами на базе полупроводниковых пластин (ППД на базе ПП). Пример такого детектора приведен на рис. 2.

Вопрос выбора того или иного типа и вида детектора для проверки электронных изделий в системе рентгеновского контроля не так прост. Делая выбор, необходимо сначала обдумать возможные достоинства и недостатки использования УИ или ППД, а уже затем, если окажется предпочтительным использовать ППД, необходимо выбрать его вид: из аморфного кремния или на базе полупроводни-



Рис. 1. Система рентгеновского контроля с усилителем изображения над просвечивающей рентгеновской трубкой (исследуемый образец отсутствует)



Рис. 2. Система рентгеновского контроля с плоскочувствительным детектором на пластине из кристаллического кремния над просвечивающей рентгеновской трубкой (исследуемый образец отсутствует)

ковых пластин. Чтобы выбрать наиболее пригодный для инспекции электронных изделий ППД, необходимо обратить внимание на следующие характеристики ППД:

- размер, разрешение и скорость формирования изображения на детекторе;
- зависимость геометрических свойств изображения и увеличения системы контроля от типа детектора;
- коэффициент усиления детектора, контрастность изображения и эффекты шумов;
- радиационные повреждения и срок службы детектора;
- стоимость детектора, а также стоимость его замены.

Принцип работы детектора

Прежде чем приступить к изучению перечисленных выше вопросов, необходимо заметить, что как УИ, так и ППД работают примерно одинаково. Детекторы обоих типов преобразуют поступающие фотоны рентгеновских лучей, прошедшие через исследуемый образец, в фотоны с другой длиной волны (обычно видимого спектра) с помощью люминофора. Чаще всего для работы с электронными изделиями используется иодид цезия (CsI), хотя возможно применение и других материалов, например сульфата гадолиния. После того как фотоны рентгеновского излучения будут преобразованы с помощью люминофора в видимые фотоны, ППД и УИ начинают работать по-разному.

В УИ видимые фотоны преобразуются в электроны, которые затем усиливаются трубкой и преобразуются обратно в фотоны на втором люминесцентном экране, после чего воспроизводятся камерой на приборах с зарядовой связью (ПЗС), и изображение выводится оператору на экран. Чем ярче точка на изображении, тем больше получено рентгеновских лучей в определенной точке УИ, что, в свою очередь, значит, что в соответствующей точке исследуемого образца плотность материала ниже, так как при прохождении через него было поглощено небольшое количество рентгеновских лучей. То есть получается негатив обычного рентгеновского снимка, сделанного в больнице на пленку: светлые области соответствуют материалу с низкой плотностью (например, плата), а темные области — материалу с высокой плотностью (например, шариковые выводы BGA). Максимальный размер выводимого

изображения зависит от размера входного окна на УИ. Разрешение изображения зависит от размера пикселя детектора. Скорость получения изображения УИ обычно составляет 25 кадров в секунду или выше. И только после этого можно предпринимать какие-то действия по улучшению качества изображения в режиме реального времени с помощью настроек программного обеспечения или оборудования. Это часто называют выводом изображения «в режиме реального времени». После улучшения изображения скорость получения изображения может повыситься. Обычный размер изображения, получаемого с помощью УИ, составляет 0,3, 1,3 или 2 Мпикселя.

В ППД видимые фотоны от люминофора ударяются о сетку КМОП-узлов, нанесенную на кремний (на подложку из аморфного кремния либо на полупроводниковую кремниевую подложку). Чем больше ударяется об определенный КМОП-узел видимых фотонов, тем больший заряд скапливается на этом узле. Система считывает с заданной частотой уровень заряда на каждом узле и интерпретирует данные как уровень яркости для воспроизводимого изображения. Чем больше заряд на узле, тем выше яркость, а значит, в соответствующей точке исследуемого образца плотность материала ниже. Максимальный размер выводимого изображения зависит от количества пикселей на КМОП-решетке. Разрешение зависит от размера пикселя решетки. Скорость получения изображения ППД может составлять 4, 10 или 25 кадров в секунду (или больше) и зависит от типа ППД: из аморфного кремния или полупроводниковой пластины. Такая скорость подразумевает, что система одинаково обращается ко всем участкам КМОП-решетки.

Однако с более медленными ППД можно работать в режиме биннинга (разбиения) 2×2. В этом режиме система обращается только к 1 узлу (пикселю) из 4. В результате использования биннинга скорость получения изображения повышается в 4 раза, и это может отображаться в технических характеристиках системы. К сожалению, цена использования техники биннинга — уменьшение вдвое разрешения детектора. То есть «биннигованный» детектор может формировать изображение быстрее, но при этом теряются мелкие детали изображения, что нежелательно при работе

с небольшими элементами, которые необходимо проверять в электронных изделиях.

Для формирования правдоподобного изображения «в режиме реального времени» для проверки электронных изделий считается минимально достаточной скоростью 10 кадров в секунду. Детекторы, для которых требуется использовать биннинг даже при этой частоте, можно считать неприемлемыми для контроля электронных изделий, поскольку без биннинга время проверки, необходимое для формирования изображения при каком-либо перемещении исследуемого образца, может значительно увеличиться. Это, в свою очередь, может привести к снижению производительности системы контроля. Обычный размер изображения, получаемого с помощью ППД для контроля электронных изделий, составляет 1, 1,3 и 3 Мпикселя.

Чтобы выбрать тип детектора, который подходит для конкретной электронной системы, следует учитывать ряд дополнительных факторов. И УИ, и ППД имеют свои преимущества, но оба типа детекторов также имеют и ограничения. Чтобы обеспечить наиболее высокий уровень контроля, эти факторы следует рассматривать не просто в зависимости друг от друга, но и в сравнении с разнообразными детекторами такого же родового типа, представленными на рынке. Доступные на рынке УИ и ППД имеют различные характеристики.

Увеличение системы

Все УИ, как правило, имеют приблизительно колониобразную форму (рис. 1), а размеры рентгеновских систем на практике ограничиваются, чтобы обеспечить удобство монтажа и ограничить площадь опорной поверхности при заданных размерах исследуемого образца изделия, а также в зависимости от габаритов ограждающего шкафа, который обеспечивает необходимую радиационную безопасность. Исходя из этого, определяется максимальное расстояние между люминофором детектора и фокальным пятном рентгеновской трубки. В отличие от этого ППД, что следует из их названия, не характеризуются такими размерами по вертикали, как УИ (рис. 2). Поэтому ППД можно разместить на большем расстоянии от фокального пятна трубки при такой же конструкции (размерах) обеспечивающего радиационную безопасность шкафа. Поскольку расстояние между фокальным пятном трубки и входом детектора является одним из основных параметров, определяющим геометрическое увеличение рентгеновской системы, то при одинаковой конструкции шкафа система контроля на основе ППД позволяет достичь значительно большего геометрического увеличения, чем при использовании УИ.

Однако на практике чаще применяют иное обозначение увеличения рентгеновской системы контроля. Это системное (или общее) увеличение. Этот параметр представляет собой комбинацию значений геометрического увеличения и физического размера детектора в сочетании с размером устройства отображения окончательного изображения, которое просматривает оператор. Системное

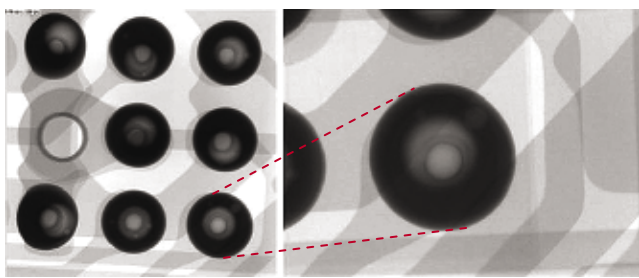


Рис. 3. Пример максимального увеличения изображения (без цифрового масштабирования) одного и того же места в проверяемом образце платы сотового телефона

увеличение — это отношение фактического размера объекта и размера этого объекта на дисплее оператора [2]. Поэтому при большем размере экрана дисплея оператора в списке технических данных указывается более сильное увеличение системы, но разрешение такого экрана, как правило, совпадает с меньшими вариантами, то есть контролер не получает дополнительной информации для анализа.

В то же время физической размер активной области формирования изображения, используемой в двух типах детекторов, различается, что может повлиять на достижимое увеличение системы. Типовая область контроля УИ в системах, используемых для электронных изделий, обычно представляет собой круг, диаметр которого составляет приблизительно 100 мм. Доступны УИ большего диаметра (обычно более дорогие), но уровень кривизны входа детектора при этом обычно обуславливает слишком большие искажения, неприемлемые при анализе электронных изделий. Поэтому для формирования изображения фактически используется только участок меньшего размера (диаметром 100 мм или меньше).

Размер элементов изображения, которые просматривает оператор, определяется размером пикселей на передней панели УИ, считываемых камерой на ПЗС, используемой в УИ. Типовые размеры пикселей составляют ~45×45 мкм и больше. Камеры на ПЗС изготавливаются с большим количеством пикселей. Однако экраны большинства мониторов имеют значительно меньшее разрешение. Если превысить количество пикселей, которые могут отображаться при собственном разрешении экрана (то есть один к одному), то любые дополнительные пиксели не будут показаны, и окончательное изображение будет представлять собой среднее от дополнительных пикселей. Поэтому при рентгеновском контроле не достигается столь высокое разрешение изображения, как предполагается для телефонов или цифровых камер.

В отличие от этого активные области ППД обычно значительно больше, чем у УИ. Типичные размеры сторон матрицы ППД, используемой для контроля электронных изделий, составляет 130–150 мм или больше. КМОП-решетка располагается по всей поверхности ППД. Благодаря увеличению детектора размер пикселя получается больше, чем в случае применения УИ. Типичные размеры пикселей ППД, используемых для контроля электронных изделий, составляют от ~75×75 мкм до ~200×200 мкм. Если нужен детектор с большим количеством пикселей, то требуется КМОП-решетка большей площади.

Однако при больших размерах кремниевой подложки значительно увеличиваются затраты на производство как для аморфного, так и для кристаллического кремния. Поэтому более качественные ППД дороже УИ. Существуют ППД меньшего размера, но их нельзя сравнивать с большими панелями по быстродействию и разрешающей способности. Как и при любом рентгеновском контроле, характеристики, требуемые для конкретного применения, всегда следует проверять в реальных системах с реальными образцами, а не просто по приведенным техническим данным.

Увеличение рентгеновской системы на ППД, который имеет область формирования изображения больше чем УИ, значительно меньше, чем эквивалентной системы на УИ, хотя УИ расположен ближе к фокальному пятну трубки. Поэтому, если судить по техническим характеристикам, система на УИ может иметь меньшее геометрическое увеличение, но большее увеличение системы по сравнению с эквивалентной системой на ППД. Поэтому, хотя, исходя из технических характеристик, система

на ППД может выглядеть более впечатляюще по сравнению с системой на УИ, последняя будет иметь большее реальное увеличение на экране.

Пример такого отличия реального увеличения, обеспечивающего возможность анализа, для различных типов детекторов приведен на рис. 3. На этом рисунке показаны изображения одного и того же корпуса BGA на печатной плате сотового телефона (шариковые выводы диаметром 300 мкм), полученные при максимальном увеличении в двух эквивалентных системах рентгеновского контроля. Отличие систем заключается в том, что в одной используется УИ, а в другой — ППД, причем последний расположен приблизительно на 20% дальше от фокального пятна трубки. В технических характеристиках системы на ППД указано большее значение геометрического увеличения, чем для системы на УИ, но, как видно на рис. 3, последняя система обеспечивает большее фактическое увеличение на экране в окончательном изображении. Это отличие в возможностях важно учитывать при выборе детектора для контроля конкретных электронных изделий.

Следует отметить, что при увеличении толщины печатной платы (например, за счет компонентов на второй стороне) максимальное увеличение будет отличаться меньше, чем показано на рис. 3 для тонкой платы. Чтобы компенсировать недостаточное практическое увеличение, некоторые компании могут включать в программное обеспечение обработки изображений функцию цифрового масштабирования. Однако, как и в случае применения оптической цифровой камеры, работающей в режиме цифрового масштабирования, полученное масштабированное изображение менее приемлемо и полезно для анализа, поскольку отображается меньше исходных пикселей и возможно объединение пикселей в группы. ППД с большим количеством пикселей обеспечивает больше возможностей для применения цифрового масштабирования, но следует учитывать, что такой детектор стоит дороже.

Коэффициент усиления детектора, контрастность изображения и эффекты шумов

От выбранного детектора зависит не только экранное увеличение, но и полнота использования функциональных возможностей рентгеновской трубки, а также скорость формирования изображения, скорость проверки и производительность системы контроля. Это объясняется различием принципов работы двух типов детекторов. УИ характеризуется большим коэффициентом усиления входного сигнала, представляющего собой рентгеновские фотоны (поток рентгеновского излучения), которые попадают на люминофор детектора. Детекторы ППД имеют значительно меньший коэффициент усиления, чем УИ. Иначе говоря, УИ обеспечивает большую яркость на выходе по сравнению с ППД при одинаковом потоке рентгеновского излучения. То есть чтобы для анализа получить изображение с хорошей контрастностью, для детекторов ППД требуется значительно больший поток рентгеновского излучения, который может выдать только трубка большей мощности. Однако увеличение мощности определенных типов трубок может привести к уменьшению разрешения.

Привлекательность детекторов ППД для контроля электронных изделий объясняется тем, что они обеспечивают более естественную шкалу полутонов (биты) на изображениях по сравнению с УИ. За счет этого лучше отображаются компоненты с незначительными и едва уловимыми отличиями плотности. Детекторы ППД также характеризуются значительно меньшими помехами на изображениях, но для них нужна трубка большей мощности. То есть требуется значительно меньше усреднений изображений ППД для улучшения/сглаживания, чтобы получать наилучшие результаты анализа. Поскольку высококачественные изображения для анализа получаются быстрее, то сокращается время проверки и, как следствие, увеличивается производительность системы контроля.

Пример представлен на рис. 4, на котором один и тот же корпус BGA отображается в аналогичных рентгеновских системах, содержащих различные детекторы, как и на рис. 3. Изображение при помощи ППД создается всего за несколько секунд и имеет немного лучшую контрастность (как видно в зонах соединения шариковых выводов корпуса BGA при сравнении с изображением УИ). В случае применения УИ, который отличается более высоким уровнем помех, необходимо несколько десятков секунд, чтобы усреднить несколько изображений для улучшения отношения сигнал/шум. Однако в результате оба изображения для

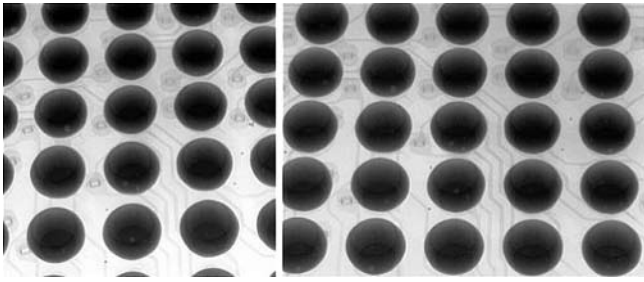


Рис. 4. Пример изображения одного и того же места под корпусом BGA:
а) получено с помощью ППД;
б) получено с использованием УИ

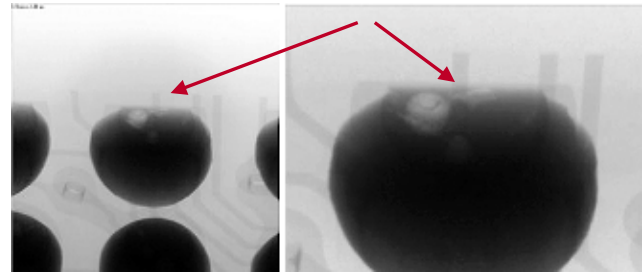


Рис. 5. Примеры изображения одного и того же корпуса BGA, на которых показана трещина в соединении:
а) полученные с помощью ППД; б) полученные с помощью УИ

данного проверяемого образца выглядят приблизительно одинаково (разница менее заметна в печатном варианте статьи и сильнее проявляется на мониторе рентгеновской системы). Разница также становится более заметна при меньшем времени усреднения изображения УИ, что весьма возможно, если требуется более высокая производительность системы контроля в производственных условиях.

Примечание. Изображения выглядят значительно лучше на экране рентгеновской системы, чем при меньшем размере и разрешении на рисунке.

С учетом увеличения, чувствительности к полутонам и шумов на изображении можно предположить, что ППД лучше подходит для контроля многих узлов печатных плат, несмотря на более высокую стоимость владения по сравнению с УИ. Однако если для контроля очень маленьких элементов требуются изображения с наибольшим увеличением, более предпочтительным может оказаться УИ. Пример показан на рис. 5, где благодаря большему увеличению на изображении УИ, которое формируется гораздо медленнее, значительно четче видна трещина на соединении шарикового вывода корпуса BGA. Контрастность изображения ППД превосходная, но из-за недостаточного увеличения этот дефект менее заметен, чем на изображении УИ.

Эффекты при наибольшем увеличении

Если требуется проверять тонкие изделия с очень маленькими элементами при очень большом увеличении, в дополнение к зависимости геометрического/общего увеличения от выбранного детектора следует проанализировать дополнительные факторы. В настоящее время в качестве наиболее очевидного примера можно привести контроль сквозных межслойных соединений кремниевых кристаллов (TSV). Хотя ППД может иметь или не иметь достаточное увеличение для осуществления контроля, физический размер формирующих изображение элементов, которые намного больше, чем в УИ, обуславливает снижение качества изображения, получаемого с помощью ППД при очень большом увеличении. Это иллюстрирует пример на рис. 6, где показано, как маленькая деталь одного и того же размера проецируется на решетки формирующих изображение элементов, размеры которых увеличиваются. Детектор с формирующими изображение элементами наименьшего

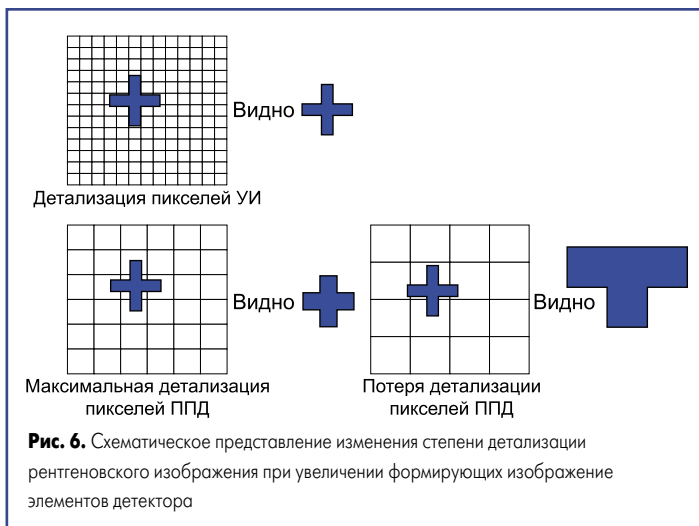


Рис. 6. Схематическое представление изменения степени детализации рентгеновского изображения при увеличении формирующих изображение элементов детектора

размера, такой как УИ, позволяет получать изображения с наилучшим разрешением, поскольку он обеспечивает наилучшее использование максимального разрешения, например, с герметизированной просвечивающей трубки. По мере увеличения размеров элементов до значения, соответствующего детекторам ППД, наименьшие компоненты отображаются все менее подробно или могут стать вообще неразличимы. Чем больше размеры элементов, тем менее подробное изображение получается при наибольшем увеличении.

Радиационные повреждения и срок службы детектора

Поскольку УИ и ППД первоначально разрабатывались для значительно более крупного медицинского рынка, а не для электронной промышленности, при выборе типа детектора также следует учитывать влияние дозы облучения на детектор. В медицинских системах нужно получить наилучшее изображение при наименьшем облучении пациента. Это не первоочередное требование при контроле электронных изделий, хотя для определенных компонентов этот вопрос следует учитывать на производстве [3].

При контроле электронных изделий проверяемый образец и детектор непрерывно подвергаются воздействию радиации, что приводит к накоплению общей дозы облучения элементами кремниевого КМОП-детектора. Маловероятно, чтобы это представляло проблему для детекторов УИ, поскольку предполагается, что для электронной промышленности они выполняются радиационно-устойчивыми. То есть скорее всего УИ сохраняет работоспособность на протяжении всего срока службы системы контроля. Единственное, что может происходить в процессе эксплуатации, — это незначительное постепенное уменьшение эффективности детектора, что обычно можно компенсировать немного большей мощностью трубки для увеличения потока рентгеновского излучения. Это не накладывает никаких ограничений на рентгеновскую трубку в системе, поскольку высокий коэффициент усиления УИ позволяет использовать его совместно с большинством трубок. Однако на ППД излучение оказывает иное воздействие, что, соответственно, приводит к другим последствиям.

Основанные на кремнии устройства могут быть повреждены излучением. Естественно, порядок величины дозы облучения печатной платы при рентгеновском контроле обычно меньше уровня, при котором могут возникнуть какие-либо проблемы для большинства компонентов и печатных плат [3]. Но изготовленные из кремния КМОП-узлы ППД подвергаются облучению каждый раз при формировании изображения, что приводит к увеличению дозы облучения с течением времени, а механизм повреждения кремния является кумулятивным. В медицинских системах накопленная на протяжении всего срока службы доза облучения ППД, скорее всего, значительно меньше критического предела детектора. Ситуация меняется, если ППД используется для рентгеновского контроля электронных изделий. По мере увеличения дозы облучения КМОП-решетки увеличивается количество поврежденных узлов/линий решетки.

Неисправности проявляются следующим образом:

- увеличение электронных шумов в детекторе;
- недостаток дополнительных пикселей и строк, особенно вследствие повреждения аморфного кремния;
- потемнение получаемых изображений из-за выгорания сцинтиллятора.

Эти неисправные узлы приводят к тому, что большинство детекторов ППД, используемых в настоящее время для контроля электронных изделий (обычно ППД из АК), приходится заменять после нескольких лет использования. Если выбран детектор ППД из АК, то стоимость его замены следует учитывать при расчете общей стоимости владения системой.

Следует отметить, что после изготовления все ППД содержат незначительное количество неисправных узлов/линий. Уменьшить это значение затруднительно, так как заданный допустимый уровень отсутствующих узлов/линий помогает увеличить выход годных изделий и уменьшить стоимость ППД, поскольку уменьшается выбраковка больших областей изготовленного кремния, необходимого для детектора. Эти изначально неисправные элементы удаляются/компенсируются в программном обеспечении обработки изображений системы и обычно не присутствуют в окончательном изображении, которое просматривает оператор.

Определить заранее время работы ППД тоже трудно, поскольку оно определяется временем накопления критической дозы облучения, после чего детектор становится непригоден для использования. Это время зависит от настроек рентгеновской трубки и расстояния между ней и детектором в системе контроля. Говоря простым языком, доза облучения линейно зависит от мощности рентгеновской трубки, то есть чем больше мощность трубки, тем больше доза облучения детектора. Как указано выше, коэффициент усиления всех ППД меньше, чем у УИ, поэтому оператор обычно всегда использует наибольшую мощность при проверке изделий в системе контроля на ППД (при этом игнорируется возможное влияние на разрешение рентгеновских трубок открытого типа).

В силу вышесказанного при использовании ППД для контроля электронных изделий пользователь должен увеличивать мощность дозы облучения детектора, чтобы обеспечить достаточный поток рентгеновского излучения для получения изображения с хорошей контрастностью (даже при использовании методов программного улучшения изображения). При этом уменьшается срок службы ППД. Такой подход предполагает, что используемая рентгеновская трубка может выдать достаточную мощность (и обеспечить требуемое разрешение).

Для преодоления описанных ограничений по большой мощности/потере разрешения может показаться привлекательным вариант перемещения детектора ближе к рентгеновской трубке. При этом, несомненно, обеспечивается значительно больший поток рентгеновского излучения через детектор при заданной мощности трубки, поскольку поток увеличивается обратно пропорционально квадрату расстояния. Но доза облучения также увеличивается обратно пропорционально квадрату расстояния от трубки. Это означает, например, что, если детектор перемещается в три раза ближе к рентгеновской трубке, то для получения такой же шкалы полутонов, как и при установке детектора на большем расстоянии, можно использовать трубку с мощностью в девять раз меньшей. Хотя это и кажется преимуществом, следует помнить, что мощность дозы облучения детектора увеличивается в девять раз и, как следствие, критическая доза облучения детектора, при которой требуется замена последнего, достигается в девять раз быстрее. При перемещении детектора ближе к трубке также не учитывается тот факт, что при этом существенно уменьшается геометрическое увеличение системы и, вероятно, ограничиваются возможности анализа изображения.

Поскольку при разработке современных детекторов для контроля электронных изделий учитываются влияние размера пикселя детектора и радиационные повреждения ППД, то в качестве основы детекторов используются пластины кристаллического кремния. В дополнение к меньшему уровню отсутствующих из-за производственных дефектов линий/узлов и меньших размеров пикселей по сравнению с ППД на АК некоторые детекторы на кристаллическом кремнии содержат световод из свинцового стекла между люминофором и КМОП-решеткой. Световод не создает препятствий для видимых фотонов, которые формируются в люминофоре при попадании рентгеновских лучей, но предотвращает повреждение КМОП-решетки рентгеновским излучением. Световод играет роль рентгенозащитного фартука, который носит персонал клиники при проведении диагностического рентгеновского обследования. Благодаря этому некоторые ППД на кристаллическом кремнии служат во много раз дольше, чем ППД на АК

при аналогичных условиях эксплуатации. Если ППД на АК требуется менять через несколько лет использования, то эти расходы следует учитывать в модели стоимости владения для такой рентгеновской системы. Маловероятно, что этот фактор следует учитывать при использовании ППД на кристаллическом кремнии, который содержит встроенный защитный экран из свинцового стекла.

Какой выбрать детектор?

Как следует из вышесказанного, и УИ, и ППД имеют определенные преимущества и недостатки в случае использования их для контроля электронных изделий. Выбор детектора зависит от предполагаемого применения (применений). С точки зрения авторов, если требуется быстрый визуальный контроль в реальном времени объектов/компонентов, которые характеризуются едва уловимыми или незначительными изменениями плотности, то следует использовать современные ППД. В качестве примера такого использования можно привести контроль при изготовлении межсоединений из медных проводников, которые в корпусах полупроводниковых изделий заменяют межсоединения из золотых проводников. Низкий уровень шумов на изображении и высокая чувствительность к полутонам детекторов ППД позволяют оптимизировать скорость и качество, которые необходимы при проведении такой проверки.

С другой стороны, если при контроле всегда требуются изображения с наибольшим увеличением/разрешением, то можно рекомендовать использовать УИ. Это объясняется тем, что по сравнению с ППД разрешение и коэффициент усиления детектора, а также большее доступное увеличение системы обеспечивают получение наилучшего изображения от рентгеновских трубок с наилучшим разрешением/характеристиками. Однако в этом случае для формирования изображения нужно немного больше времени, поскольку требуется больше усреднений изображения, чтобы компенсировать более высокий уровень шума. Поэтому УИ следует рекомендовать, например, для производства светодиодов и для анализа и контроля сквозных межслойных соединений кремниевых кристаллов (TSV), а также для анализа дефектов при производстве полупроводниковых изделий и узлов печатных плат, где скорость и производительность менее важны по сравнению с максимальным разрешением изображения.

Для всех других рентгеновских систем, которые обычно требуются, например, для проверки на стадии производства узлов печатных плат и контроля качества продукции, одинаково подходят и УИ, и ППД. В то же время выбор УИ либо ППД для конкретного месторасположения следует делать с учетом цены, производительности, потребностей в контроле в будущем и т. д.

Микрокомпьютерная томография и другие факторы

Еще одна область применения, где ППД может обеспечить значительное преимущество по сравнению с УИ, — микрокомпьютерная томография, или трехмерный рентгеновский контроль. Эта дополнительная опция предоставляется для многих современных систем рентгеновского контроля электронных изделий. В этом случае преимущество ППД объясняется тем, что благодаря меньшему уровню шумов для получения окончательного изображения требуется усреднять/получать меньше изображений по сравнению с УИ. При этом, благодаря большей чувствительности к полутонам и меньшему уровню шумов по сравнению с УИ, ускоряется процесс микрокомпьютерной томографии и улучшается конечное качество модели компьютерной томографии, что обеспечивает больше возможностей для анализа.

В этой статье авторы уделили основное внимание детекторам, которые в настоящее время используются в рентгеновских системах контроля электронных изделий. Здесь не упоминаются другие аспекты системы контроля, которые определяют большинство элементов при конкретном применении. Например, следует учитывать такие факторы, как:

- простота и скорость транспортировки и обработки образцов;
- возможности функций программного обеспечения системы для требуемого прикладного анализа;
- общая простота использования для оптимизации производительности и обеспечения проведения контроля неквалифицированным персоналом.

Все эти факторы следует учитывать при выборе наилучшей системы в каждом конкретном случае. Для проведения достоверного анализа необходимо проверить реальные тестовые образцы в системах, которые, как предполагается, соответствуют требуемым критериям. Истинные характеристики системы не всегда можно точно оценить только по приведенным техническим данным. ■■■■

Авторы благодарят доктора Эвстатина Крестева (Evstatin Krastev) и Билла Уокера (Bill Walker) за большую помощь, оказанную при написании этой статьи.

1. Bernard D. X-ray Tube Selection Criteria for BGA/CSP Inspection. Proceedings of SMTAI, 2002.
2. Bernard D., Willis B. A Practical Guide to X-ray Inspection Criteria & Common Defect Analysis. Dage Publications, 2006. Available through the SMTA bookshop.
3. Bernard D., Blish II R. Considerations for Minimizing Radiation Doses to Components during X-ray Inspection. Proceedings of SMTAI, 2003.