

ТЕХНОЛОГИИ

HD X-ray:

Рентгеноскопия высокой четкости



Текст: **Андрей Вагин**



В современных условиях скорость развития технологий как в бытовой, так и в промышленной электронике достигла такого уровня, что новшества не заставляют себя ждать годами, а появляются с завидной регулярностью.

Потребность в такой динамике развития диктуют рыночные условия. И в сфере производства техники специального назначения также возрастают требования к точности ответственных изделий, скорости обработки информации, работоспособности в экстремальных условиях, реализуемые только при внедрении новых технологий. Эти требования возможно выполнять за счет все большей миниатюризации компонентной базы **рис 1** и усложнения радиоэлектронных изделий **рис 2**: габариты становятся все меньше, а внутреннее наполнение — все насыщеннее.

Контроль качества изделий в современных условиях

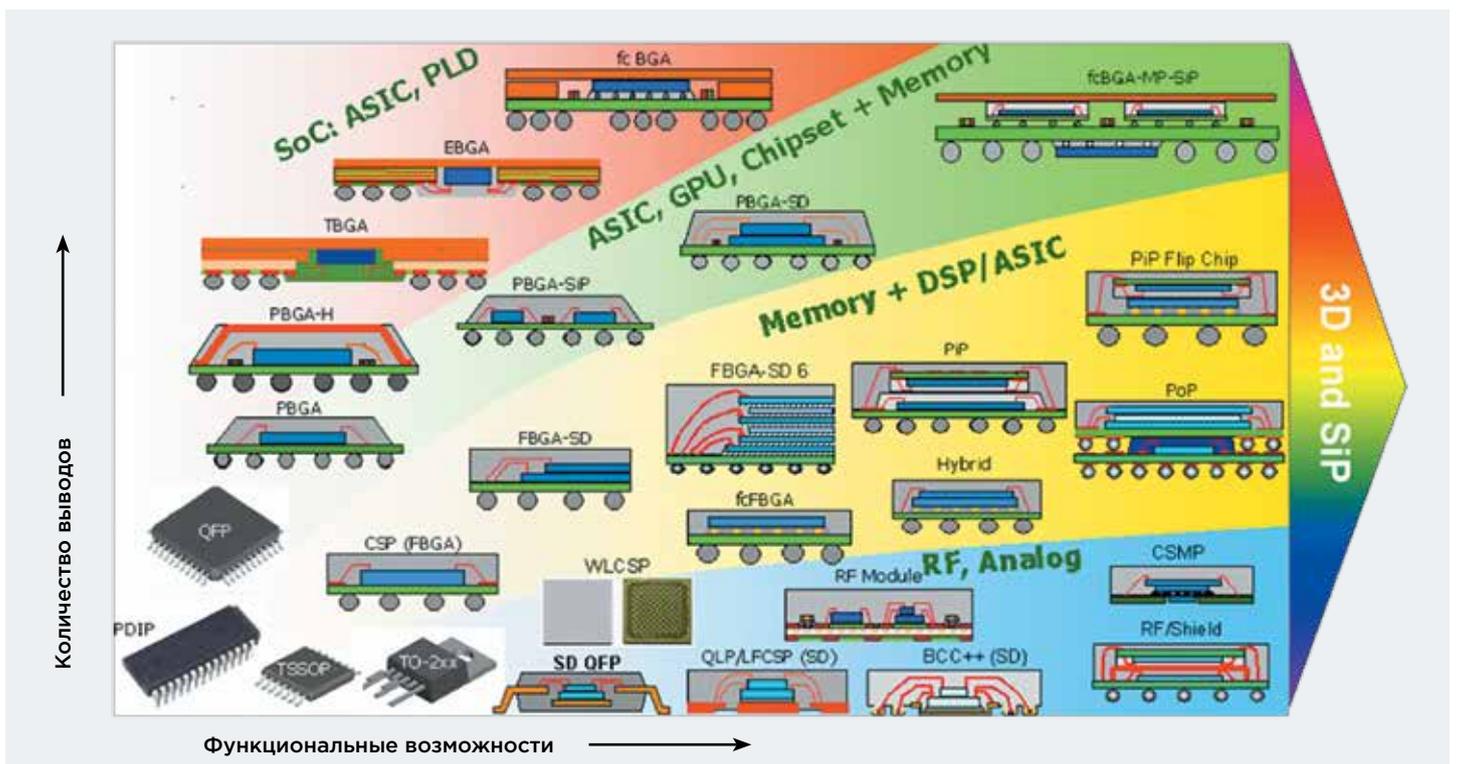
Наряду с данными тенденциями предъявляются повышенные требования и к средствам контроля, которые могут обеспечить выявление дефектов в новых условиях. Возможности современного оборудования автоматической оптической инспекции позволяют распознать дефекты нанесения паяльной пасты, установки компонентов, качества паяного соединения даже для самых миниатюрных компонентов. Но учитывая, что современные изделия уже сложно представить без использования микросхем с выводами под корпусом, таких как QFN, BGA, оптический контроль не в состоянии дать однозначный ответ о качестве паяного соединения. Также по ряду причин до сих пор не удается полностью отказаться от выводных компонентов, и остро стоит вопрос контроля заполнения припоем монтажных отверстий ПИС 4 и ПИС 3, что опять же не реализуемо с помощью оптики.

Также для автоматизированного контроля собранных печатных узлов получили широкое применение системы электрического внутрисхемного контроля, позволяющие диагностировать широкий спектр неисправностей и несоответствий, в том числе и на этапе входного контроля электронных микросхем. Диагностировать и локализовать дефект уже дорогого стоит,

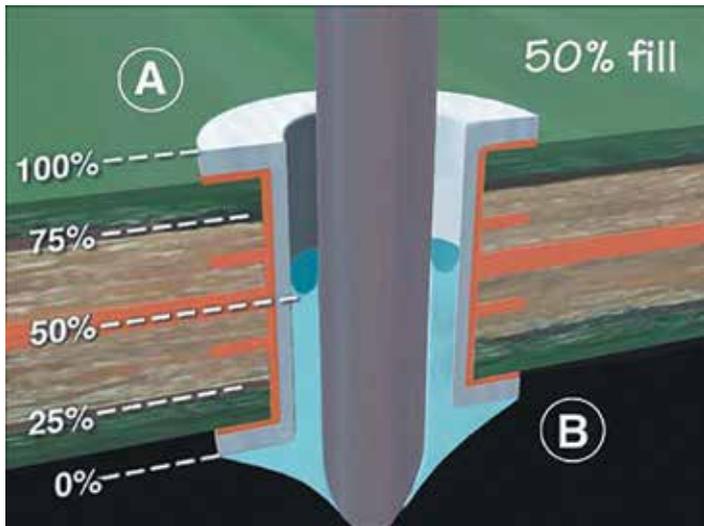
но как понять причину дефекта, как заглянуть внутрь изделия? Ведь концепция бездефектного производства должна строиться не на устранении выявленных дефектов, а на их предупреждении и своевременном внесении изменений в технологический процесс.



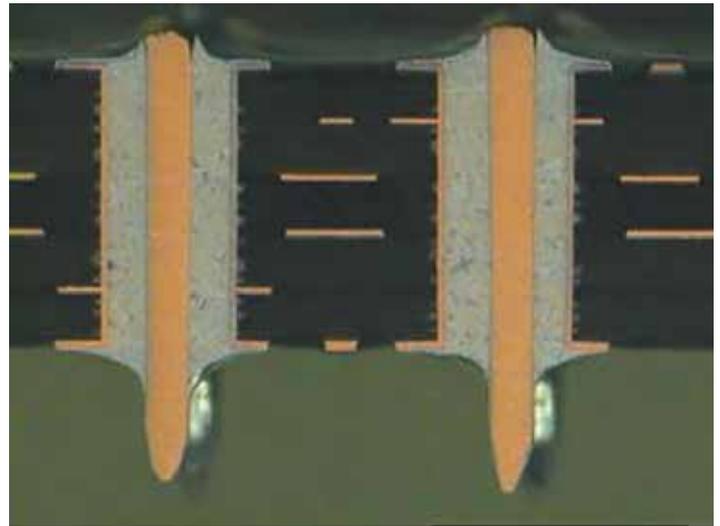
1 Компонент 03015, Размеры: L x W x T = 0.2 x 0.1 x 0.1 mm



2 Тенденция усложнения микросхем



3 По IPC-A-610: Для класса 3 вертикальное заполнение отверстий припоем не менее 75%



4 Пример правильного заполнения припоем монтажных отверстий

Входной контроль

Наряду с ростом спроса на высокотехнологичные изделия растет спрос на компоненты и современные микросхемы. В существующих условиях если есть спрос, то есть и предложение, но часть этого предложения неизбежно будет контрафактом или же просто некачественным продуктом — таковы нынешние реалии. Зачастую производители, анализируя причину серийно возникающего дефекта, ищут несоответствия в материалах, используемых для пайки, грешат на неправильно выстроенный термопрофиль, на неправильный конструктив изделия. Хотя причина гораздо проще — используемые микросхемы изначально оказываются несоответствующими оригиналу. Хуже всего, что при этом они могут быть рабочими, но не в состоянии обеспечить ожидаемые выходные характеристики. Визуально они совершенно неотличимы от оригинала, а что внутри? Да все что угодно: обрыв разварки, нарушение структуры кристалла, бывает, что кристалл просто отсутствует.

Неразрушающий контроль

Все вышеперечисленное говорит о том, что нужен инструмент, который позволял бы «показать все, что скрыто». Причем показать, не нарушая внешнюю оболочку объекта, т.е. нужен инструмент для неразрушающего контроля.

Поэтому широкое применение получили системы рентгеновского контроля, обладающие возможностями заглянуть внутрь объекта, не разрушая его структуру. Возвращаясь к вопросу о контрафакте, рассмотрим как пример рис 6, где показано изображение, полученное

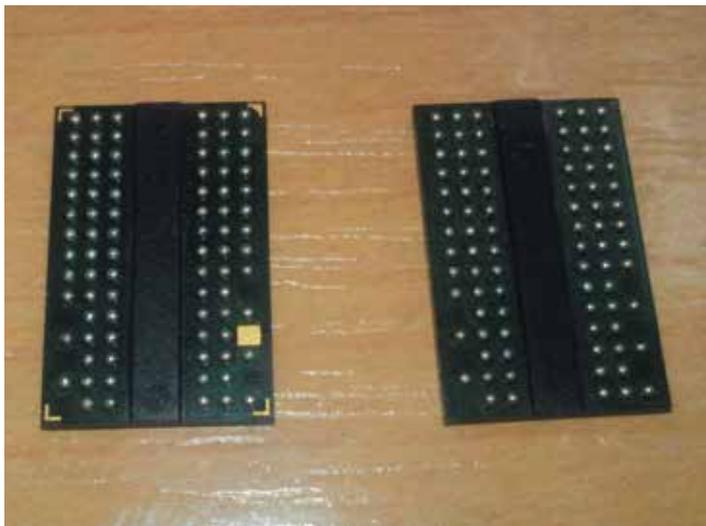
с помощью рентгеновской установки двух визуально одинаковых микросхем с идентичной маркировкой рис 5.

В процессе исследования было выявлено, что микросхемы, несмотря на одинаковую маркировку, имеют различную внутреннюю структуру — кристаллы разных размеров, разная разварка, а также разные форма и траектория внутренних дорожек в миниplate.

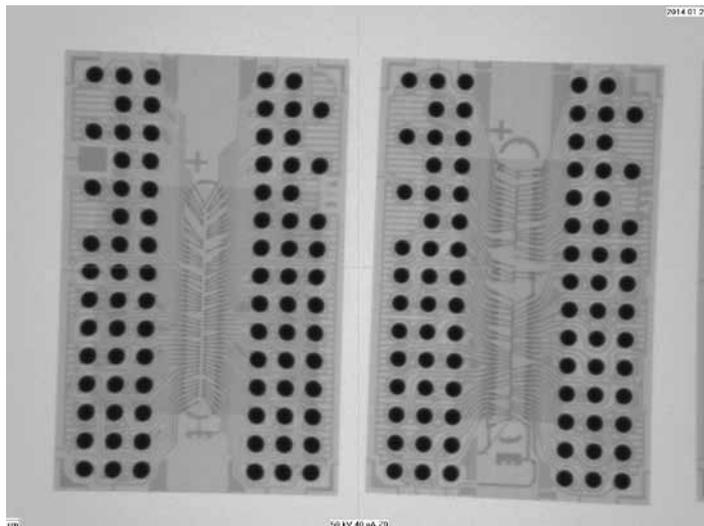
Как видно из полученных изображений, шарики на двух микросхемах не совпадают по форме рис 7. И если на одной из микросхем форма шариков обладает характерной повторяемостью, то на другой о какой-то идентичности говорить не приходится рис 8. И это на компонентах, которые не проходили процесс оплавления. Значительное отклонение размера и формы шариков у одного компонента предполагает возможный «реболлинг». То есть, если у вас входной контроль компонентов ограничивается только визуальным анализом и верой в непогрешимость поставщика, будьте готовы к тому, что к конечному потребителю может уйти бракованное изделие. На выходном контроле выявить брак будет значительно сложнее, так как на начальном этапе эксплуатации и прохождении функционального контроля изделие может быть вполне рабочим.

Очевидно, что при повсеместном распространении микросхем с выводами под корпусом, при использовании дорогих микросхем рентгеновский контроль становится необходимостью. Более того, для многих читателей данная информация не нова: кто-то уже пользуется рентгеновскими установками на своем производстве, кто-то прибегает к услугам сторонних организаций.

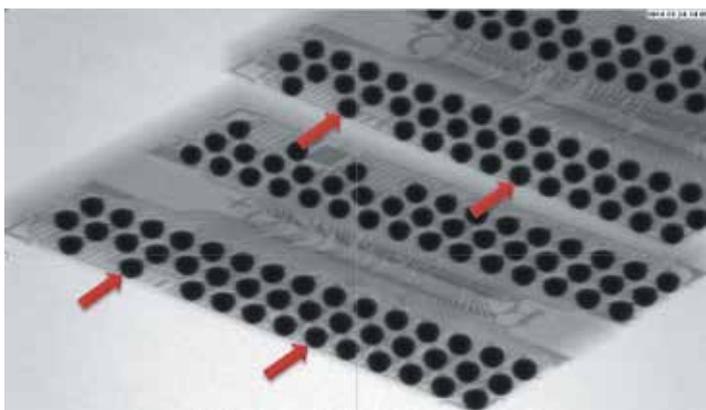
Цель данной статьи — не убедить в необходимости использования такого инструмента, а показать, насколько



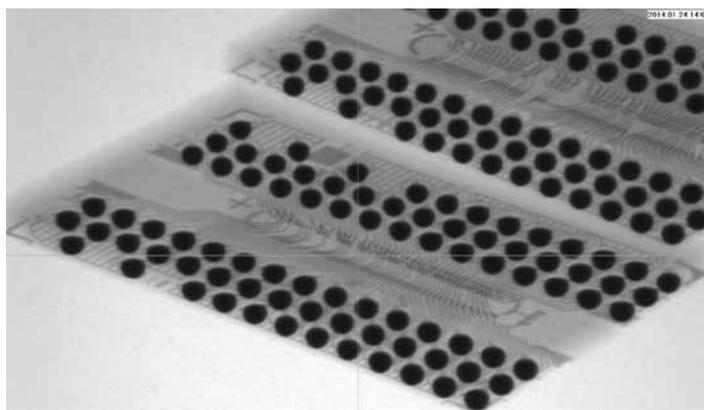
5 Внешний вид компонентов BGA снизу



6 Разная внутренняя структура компонентов BGA с одинаковой маркировкой



7 Различная форма шариков двух компонентов BGA



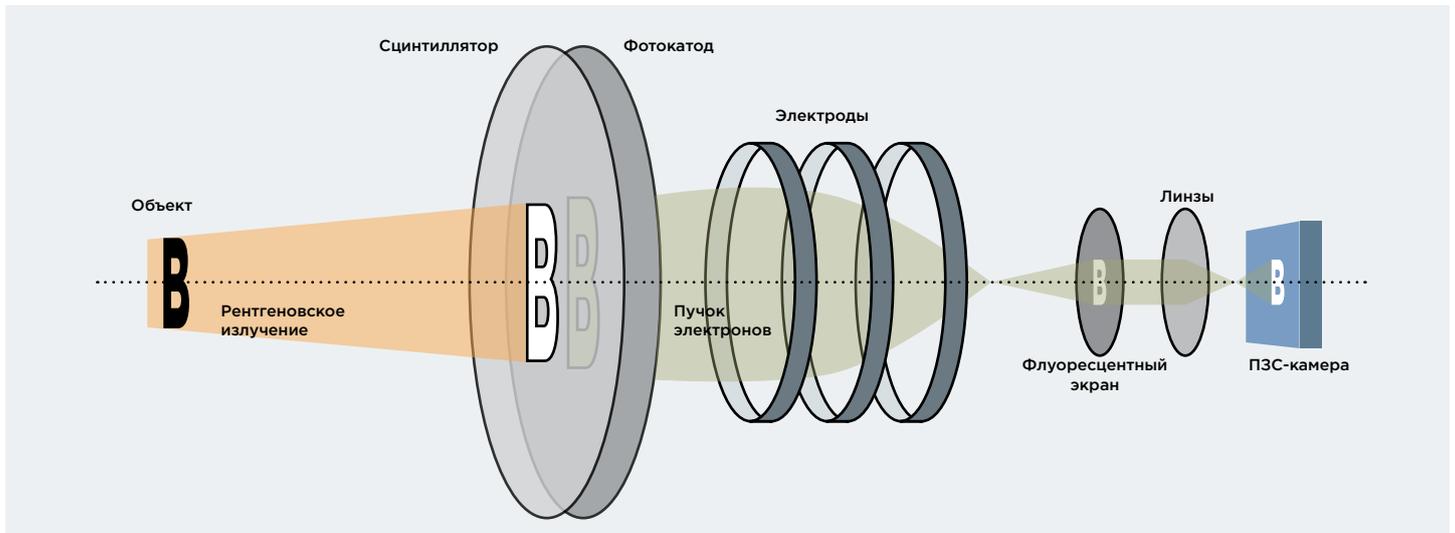
8 Различная форма шариков одного компонента BGA

ко современные рентгеновские установки соответствуют актуальным тенденциям. Ведь с миниатюризацией компонентов становятся критичными характеристики рентгеновских установок как по разрешающей способности и геометрическому увеличению, так и по четкости изображения, отсутствию шумов, стабильности картинки. Все вышеперечисленные параметры так или иначе попадают под определение HD — изображение высокой четкости (High-Definition) — это современный стандарт качества, отвечающий потребностям рынка.

И если появилось телевидение (HDTV), интерфейс передачи данных (HDMI), прочие многочисленные HD, то может ли и оборудование для рентгеновской инспекции обладать тем же стандартом четкости изображения, а, главное, соответствовать ему? Может, если за реализацию такой идеи берется общепризнанный мировой лидер в данной сфере — компания General Electric (GE) Sensing & Inspection Technologies GmbH, подразделение phoenix | x-ray.

За долгие годы сотрудничества Osteка и phoenix | x-ray, а это не много ни мало 12 лет, всеобщее признание среди конечных пользователей получила рентгеновская установка microme | x. Из более чем 80 единиц оборудования под брендом phoenix | x-ray, введенных в эксплуатацию на территории РФ, в пользу microme | x сделали свой выбор более 45 предприятий. Данная установка находится в среднем ценовом сегменте, обладает исчерпывающим программным обеспечением, имеет трубку с высоким максимальным напряжением -180 кВ, что позволяет решать широкий спектр задач неразрушающего контроля.

Разработчики GE не остановились на достигнутом и создали новую установку. Ряд передовых инженерных решений позволил получить беспрецедентные результаты по качеству изображения и спектру решаемых задач, а сама установка теперь носит оправданное название — microme | x DXR HD. Давайте рассмотрим составляющие, благодаря которым получаемое изображение обладает столь высокой четкостью.



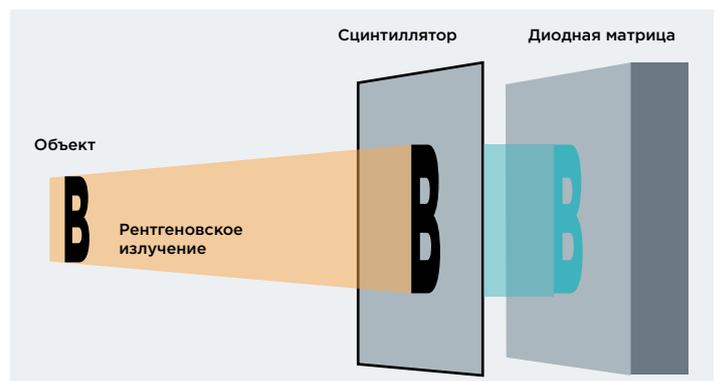
9

Усилитель изображения (Image Intensifier)

Цифровой плоскочувствительный детектор DXR250RT

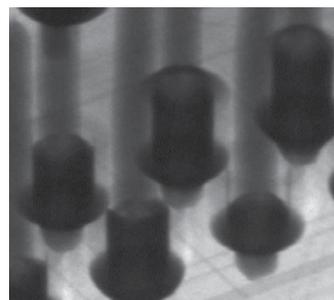
Цифровой панельный детектор в рентгеновских установках — явление давно не новое, но без этого технически сложного устройства невозможно представить действительно качественное изображение. Напомним, что существуют два основных типа электронных детекторов: это так называемый фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), в английской литературе известный как Image Intensifier (усилитель изображения), и цифровой панельный детектор. Основное отличие усилителя изображения от цифрового детектора состоит в принципиальной схеме преобразования рентгеновского излучения в регистрируемое изображение.

В фотоэлектрическом усилителе все многочисленные преобразования сигнала происходят с помощью аналоговых устройств, а для оцифровки сигнала используется цифровая ПЗС-камера **рис 9**. Тот факт, что последняя операция происходит с помощью цифрового устройства, не дает права утверждать, что данный тип детектора цифровой. На это стоит обратить особое внимание, так как иногда недобросовестные поставщики на рынке рентгеновских установок выдают детекторы типа Image Intensifier за цифровые. В панельном цифровом детекторе **рис 10** рентгеновское излучение передается на сцинтиллятор, преобразуется в видимый свет, который напрямую попадает на диодную матрицу, регистрирующую изображение. Такое изображение отличается высокой контрастностью, лучшим соотношением сигнал/шум и практически мгновенной скоростью получения. А самое главное, изображения, получаемые этими способами, очень сильно различаются по динамическому диапазону. Если лучшие образцы ФЭУ обладают способностью выдавать до 200 градаций серого, то для плоскочувствительных детекторов это значение может достигать и 10000.



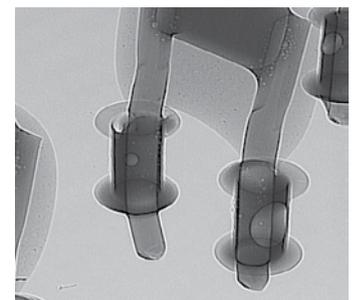
10

Цифровой плоскочувствительный детектор



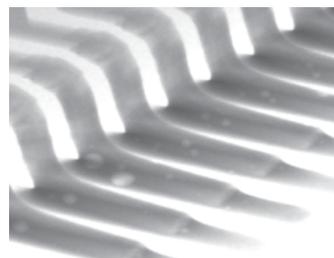
11

Изображение полученной с помощью Image Intensifier



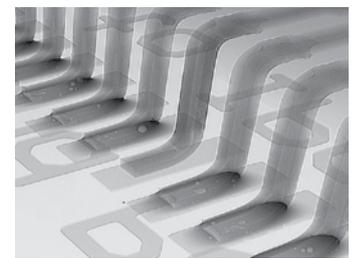
12

Изображение полученной с помощью Цифрового плоскочувствительного детектора



13

Изображение полученной с помощью Image Intensifier

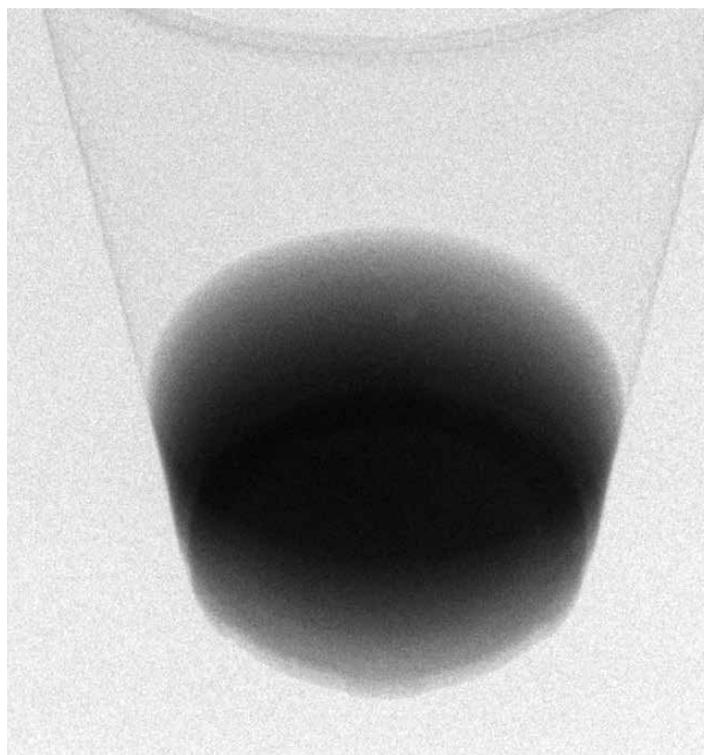


14

Изображение полученной с помощью Цифрового плоскочувствительного детектора



15 Цифровой плоскопанельный детектор DXR250RT



16 Пластиковый стакан с водой

Впрочем, это именно тот случай, когда лучше посмотреть на результаты получаемого изображения, которые говорят сами за себя [рис 11](#) и [12](#), [13](#) и [14](#).

Выше мы рассмотрели две принципиальные схемы преобразования рентгеновского излучения. Очевидно, что распознаваемость дефектов на рентгеновских установках с цифровыми панельными детекторами значительно лучше и по четкости, и по соотношению сигнал/шум, и по контрастности. Но и цифровые панельные детекторы, в свою очередь, у разных производителей отличаются по своим характеристикам. Рассмотрим основные параметры, характеризующие цифровые панельные детекторы, на примере DXR250RT [рис 15](#), именно ими снабжаются рентгеновские установки производства GE.

Во-первых, плоскопанельные детекторы различаются по материалу, из которого изготовлен сцинтиллятор — слой вещества, способный излучать свет при поглощении ионизирующего излучения. От этого зависит так называемая квантовая эффективность, то есть количество ионизирующего излучения, преобразованного в видимый свет. В качестве сцинтиллятора в детекторе DXR250RT выступает самое эффективное на сегодняшний день соединение - иодид цезия (CsI), позволяющее преобразовать в кванты видимого света до 80% рентгеновского излучения.

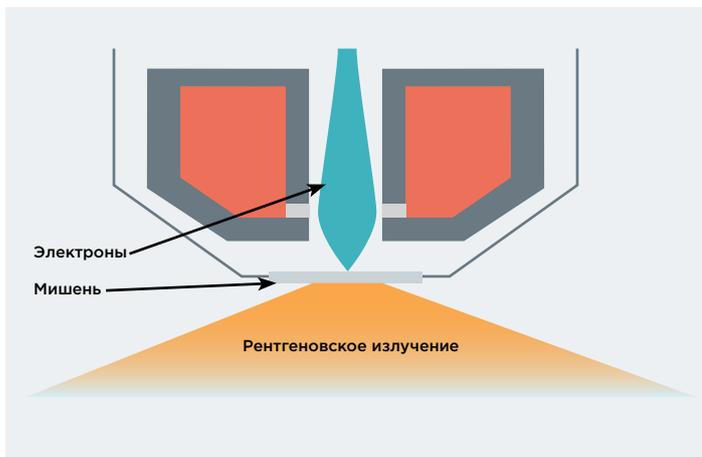
Во-вторых, DXR250RT обладает самым высоким быстродействием среди всего спектра детекторов, представленных на рынке — 30 кадров в секунду. Это позволяет быстрее получать качественное изображение.

Для понимания процесса можно рассмотреть небольшой эксперимент, проведенный нашими специалистами на ежегодной международной выставке ЭлектронТех-Экспо 2014. В качестве исследуемого образца был взят обычный пластиковый стакан, наполненный обычной водой и помещенный в рабочую область рентгеновской установки. Как известно, вода обладает низкой вязкостью и легко изменяет свое состояние при внешнем воздействии. Задача состояла в том, чтобы проверить способность рентгеновской установки уловить малейшие колебания жидкости при перемещении рабочего стола в режиме реального времени — и задача была выполнена. К сожалению, статичная картинка [рис 16](#) не передает результат эксперимента, но итог эксперимента можно посмотреть, перейдя по ссылке QR-кода. На видео можно наблюдать колебания воды без всякого «затормаживания», что говорит о том, что изображение формируется мгновенно и позволяет видеть любые изменения состояния в режиме реального времени.



Проканируйте QR-код и смотрите видео фиксации изменения состояния жидкости в режиме реального времени на установке рентгеновской инспекции microme|X DXR HD

В-третьих, одними из самых важных параметров являются физические размеры матрицы детектора и каждого пикселя в отдельности. С размером самого детектора все просто — чем он больше, тем с большей площади мы сможем получить информацию. Детектор DXR250RT обладает внушительными размерами матрицы — 205x205 мм². Что касается пикселя, то казалось бы: чем меньше размер каждой дискретной составляющей, тем больше их поместится на единицу площади, и, соответственно, тем большая детализация изображения получится в итоге. Однако на практике больший размер пикселя позволяет получить более четкое изображение с лучшим соотношением сигнал/шум. Шум изображения, при прочих равных условиях, обратно пропорционален квадрату площади пикселя, то есть чем больше пиксель, тем контрастнее получаемое изображение. Поэтому важно подобрать оптимальное соотношение между детализацией и контрастностью для получения максимально качественного изображения. Инженерам GE удалось найти параметры, позволяющие получить наиболее четкое изображение при размере пикселя — 200x200 мкм².



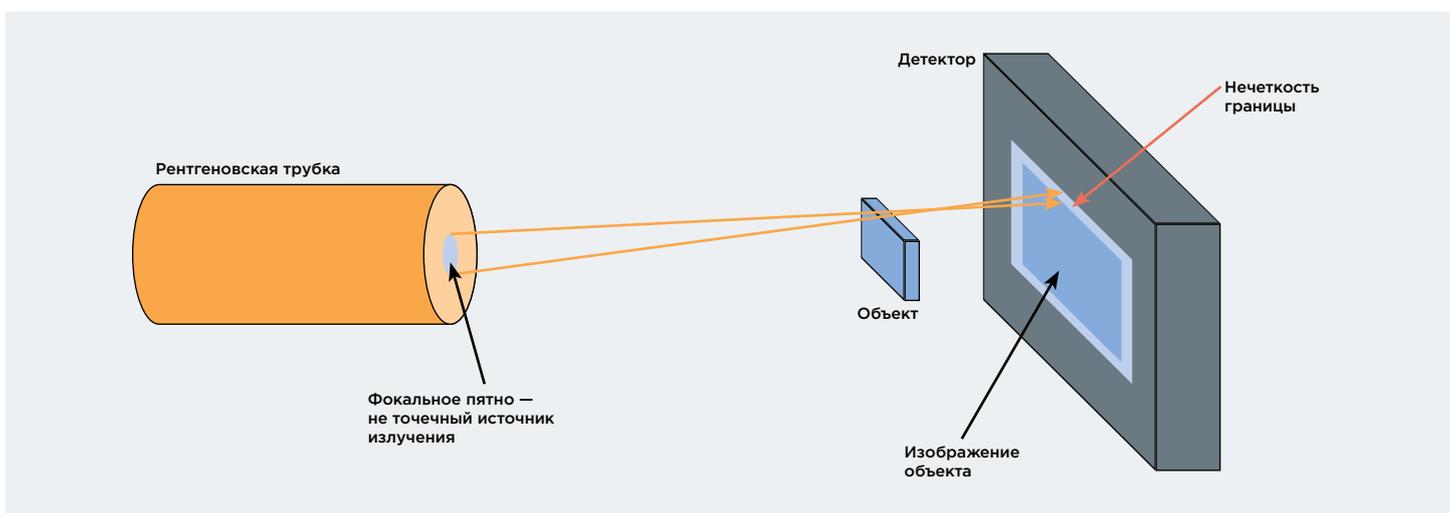
17

Принцип работы рентгеновской трубки

Прострельная мишень diamond | window

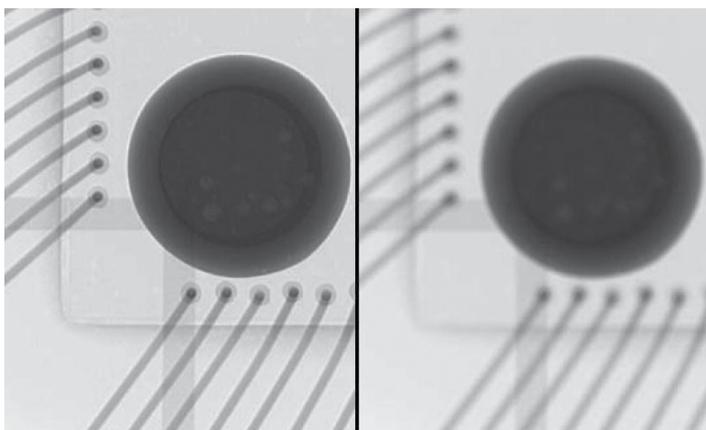
Здесь нужно сделать небольшое отступление и рассказать о принципе работы рентгеновской трубки. Рентгеновскую трубку можно представить в виде цилиндра, в котором электроны за счет ускоряющего напряжения разгоняются и бомбардируют металлическую мишень, в результате резкого торможения электронов имитируется рентгеновское излучение рис 17. Разрешающую способность установки, то есть минимально различимые элементы изображения, напрямую характеризует размер фокального пятна. Чем меньше фокальное пятно, тем, соответственно, лучше разрешающая способность и четче получаемое изображение рис 18. Но и тут не обойтись без подводных камней. При высокой мощности рентгеновского излучения фокальное пятно увеличивается для предотвращения плавления материала мишени вследствие подачи высокой плотности энергии. По этой причине исследования мелких деталей в сильно поглощающих материалах ограничены. Приходится либо снижать мощность подаваемого напряжения для сохранения малого размера фокального пятна (при этом излучение почти не проходит через образец, что ведет к созданию изображения с низким соотношением сигнал/шум), либо работать на высокой мощности, но жертвовать увеличением фокального пятна, что приведет к размытию изображения. И в том и в другом случае мы получаем ухудшение изображения, а это критично для распознавания мелких особенностей исследуемого объекта. Какой смысл в заявленных на бумаге параметрах, если в рабочих условиях их применение возможно в таком узком диапазоне?

Для решения этой проблемы phoeix | x-ray предлагает мишень diamond | window (алмазное окно), изготавливаемую по технологии CVD (химическое осаждение из паровой фазы).



18

Зависимость нечеткости границ от размера фокального пятна



19
Результат сканирования diamond|window/Бериллиевая мишень



20
Зависимость размера фокального пятна от подаваемой мощности

В стандартных мишенях предыдущего поколения вольфрамовый слой осаждается на бериллиевую пластину, в алмазном же окне в качестве теплоотводящей подложки используется пластина из искусственного алмаза. Использование алмаза позволяет более эффективно отводить тепло и подавать большие плотности энергии на мишень.

Данный тип мишени подходит для всех трубок rhoenix, оснащаемых прострельной мишенью, с ускоряющим напряжением до 180 кВ. Благодаря своей высокой теплопроводности мишень такого типа, не содержащая токсичных веществ, дает возможность получать большие мощности рентгеновского излучения при меньшем размере фокального пятна. Это позволяет достичь высокого разрешения при высокой выходной мощности трубки, а также сформировать изображение до двух раз быстрее без потери качества.

На рис. 20 представлена зависимость размера фокального пятна от мощности подаваемого напряжения для стандартной бериллиевой мишени и diamond|window. Как видно из графика при мощностях выше 5 Вт размер фокального пятна для одного и другого вида мишени сильно различается. Различимость деталей для бериллиевой мишени при мощности на трубке 20 Вт упадет с 0,5 мкм (заявленных в спецификации) до 20 мкм. Наглядно результат съемки одного и того же объекта при использовании

разных типов мишеней можно увидеть на рис. 19.

Наряду с применением цифрового плоскопанельного детектора использование мишени diamond|window значительно расширяет рабочий диапазон установки Micromex DXR HD:

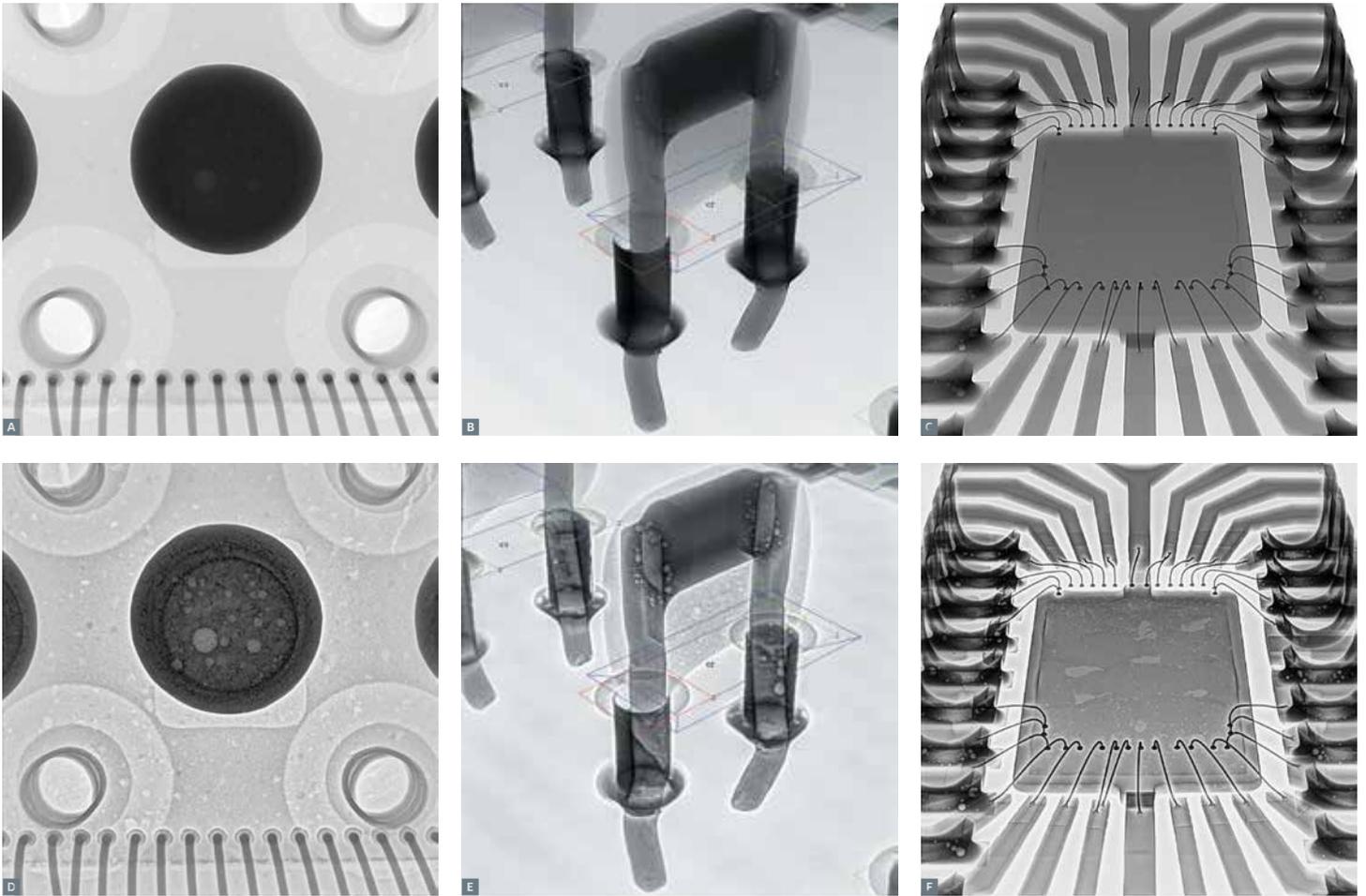
- время получения рентгеновских изображений без потери качества в два раза меньше;
- высокая выходная мощность при высоком разрешении;
- улучшенная стабильность положения фокального пятна во время длительных измерений (например, для компьютерной томографии);
- увеличенный срок службы мишени благодаря меньшей деградации при высоких подаваемых мощностях;
- алмазное окно (diamond|window) позволяет достичь мощности до 20 Вт;
- отсутствуют токсичные элементы.

Программное обеспечение x|act pro

В наше время нельзя обойтись без программного обеспечения, которое зачастую увеличивает возможности оборудования до небывалых высот. Все рентгеновские установки microme|x DXR HD снабжены самым современным софтом x|act pro версии 9.0, возможности которого можно разделить на две составляющие. Это функционал, связанный с обработкой изображения, и опции, позволяющие автоматизировать операции инспекции изделия. Конечно, описать весь функционал программного обеспечения в рамках одной статьи не получится, поэтому остановимся на последних обновлениях.

Итак, начнем по порядку. Что касается обработки изображения, мы не будем подробно останавливаться на таких понятиях как усреднение изображения и прочие алгоритмические обработки, которые в том или ином виде используются в рентгеновских установках других производителей. Отдельно хотелось бы рассказать о новинке конца 2013 года, которая впервые была представлена на международной выставке Productronica 2013 в Мюнхене и по праву произвела фурор среди посетителей. Это новый модуль обработки изображения Flash!Filters™. Впрочем, и посетители московской выставки ЭТЭ2014 также могли наблюдать результаты работы этой новинки на нашем стенде.

Ни для кого не секрет, что результат двухмерной рентгеновской инспекции сильно зависит от оператора ввиду особенностей самой технологии. Может быть пропущен тот или иной дефект или присутствовать неоднозначность интерпретации результатов съемки. Обработка снимков модулем Flash!Filters™ адаптирует изображение для восприятия человеческим глазом, что позволяет существенно повысить объективность инспекции. Дело в том, что человеческий глаз способен



21

Результат применения программного модуля Flash!Filters

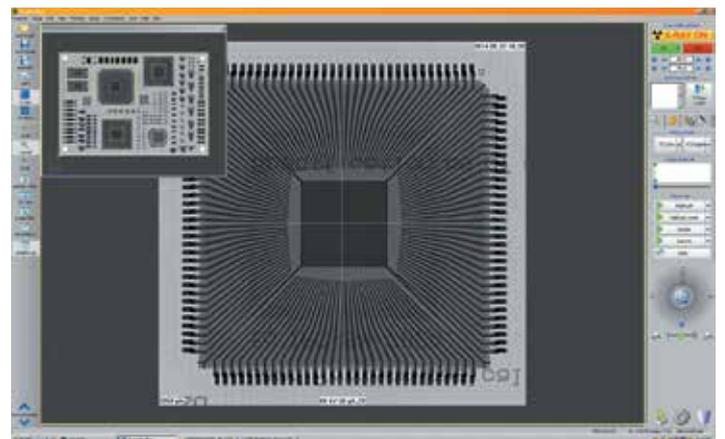
различать не более двух сотен уровней серого, а современные цифровые панельные детекторы способны выдать их до нескольких тысяч. И поэтому, несмотря на то, что информация о всех дефектах уже содержится на снимке, оператор просто не в состоянии увидеть их одновременно. Фильтр обрабатывает снимок, выбирая из тысяч уровней серого те, которые содержат полезную информацию, и сжимает их в те самые две сотни. Как бы вы отнеслись к тому, чтобы по одному клику исследуемая область рис. 21 А В С преобразовывалась во что-то подобное рис. 21 D E F.

Впечатляет, не правда ли? И это не какой-то фотомонтаж — именно так работает **Flash!Filters**.

Давайте вернемся к другим возможностям программного обеспечения x|act pro, позволяющим автоматизировать инспекцию исследуемых образцов. Учитывая, что производственные предприятия, использующие рентгеновские установки, имеют потребность в инспекции серийных изделий, необходим инструмент, который позволял бы ускорить работу по распознаванию дефекта, не выбываясь из цикла сборки. Рассмотрим ситуацию, когда появляется большая серия ответственных изделий, содержащих несколько дорогостоящих компонентов BGA, и у предприятия есть потребность в 100% контроле пайки данных

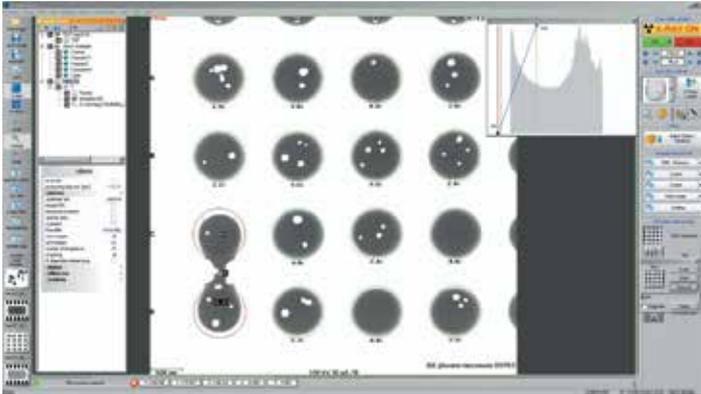
микросхем. Для решения таких задач в x|act pro предусмотрена возможность создания так называемых макросов. То есть оператор на одном изделии создает карту печатного узла рис. 22, привязывается к базовой точке по аналогии с реперным знаком и записывает все операции, производимые с образцом, задавая траекторию инспекции и параметры, при которых проводится анализ. Затем он сохраняет все эти действия в программу.

При последующем анализе аналогичных изделий



22

Карта изделия



23
Модуль исследования микросхем BGA

требуется только сделать привязку к базовой точке и запустить созданный ранее макрос, все дальнейшие действия программа произведет сама.

Более того, для удобства исследования можно использовать предустановленные модули, которые также можно записать в макрос:

- исследование микросхем BGA;
- расчет количества пустот;
- контроль компонентов Flip-Chip;
- измерение кривизны проводников.

Возвращаясь к задаче, мы можем применить модуль исследования микросхем BGA рис 23, который позволит в автоматическом режиме определить:

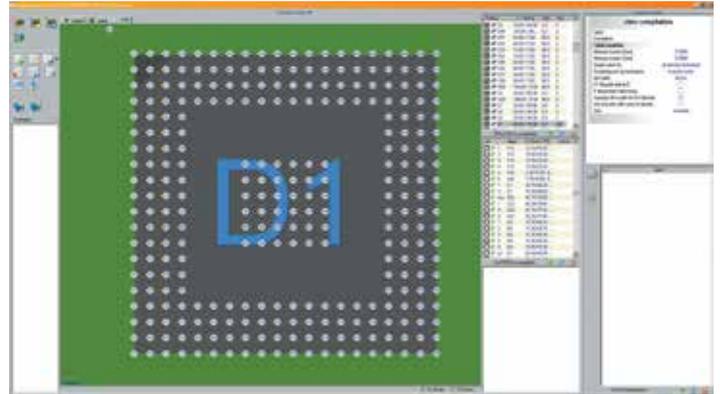
- округлость, форму;
- смещение;
- превышение и недостаточность размеров;
- наличие пустот;
- недостаточность припоя;
- короткие замыкания;
- смачивание;
- и многое другое.

Согласитесь, с таким набором возможностей наша задача не кажется такой уж долгой и сложной.

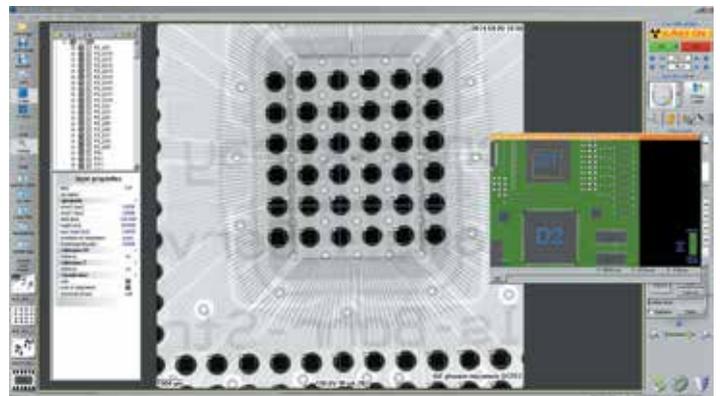
Далее рассмотрим вариант, когда система качества подразумевает 100% контроль всех компонентов каждого изделия. Даже в этом случае уникальное ПО имеет свои решения. x|act pro позволяет осуществить привязку CAD данных исследуемого образца к рабочей программе рис 24 и рис 25, что дает возможность анализировать, например, все шарики для конкретной BGA-микросхемы.

Здесь же появляется возможность применения так называемых «стратегий» по аналогии с алгоритмами, которые используются в системах для автоматической оптической инспекции (АОИ).

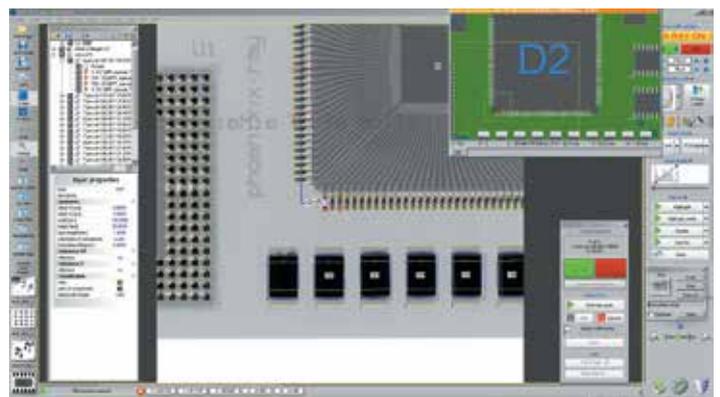
То есть мы получаем рентгеновскую установку с функционалом полноценной АОИ рис 26, но со значительно расширенным диапазоном исследуемых областей за счет возможности заглянуть внутрь объекта. Немаловажным является то обстоятельство, что наряду с предустановленными стратегиями



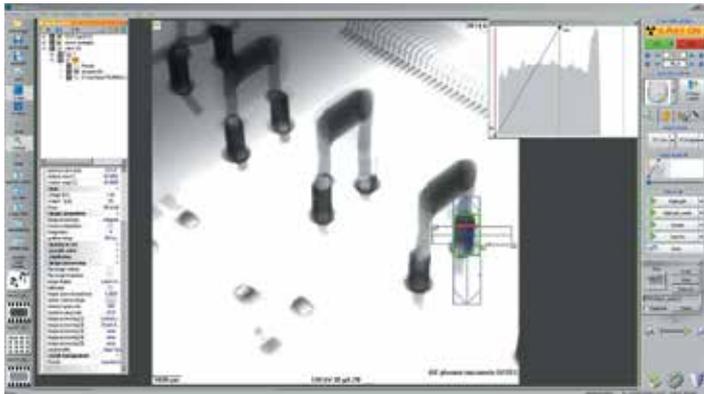
24
Рабочая программа с привязкой CAD-данных



25
Интерфейс рабочего стола программы с привязкой CAD-данных

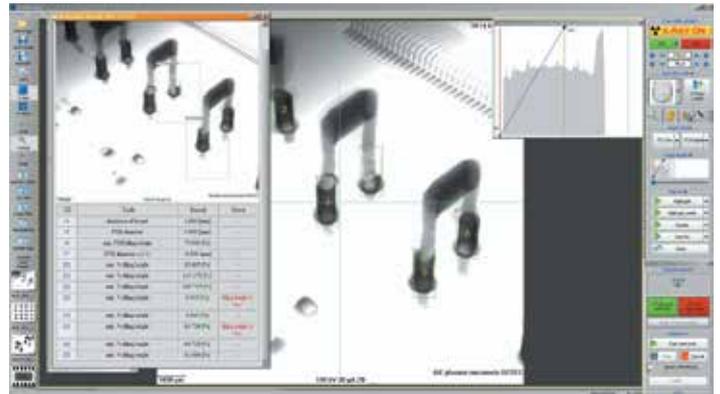


26
Пример работы стратегии для многывыводной микросхемы (красным цветом выделены пины, распознанные как дефект)



27
Пример создания алгоритма для анализа заполняемости монтажных отверстий при ТНТ-монтаже

оператор может написать собственные. Как пример, рассмотрим рентгеновское изображение монтажного отверстия, заполненного припоем **рис 27**. По аналогии с программированием алгоритмов для АОИ мы задаем параметры исследуемой области (зеленый прямоугольник на **рис 27**): координаты, угол наклона. В данном случае идеальным результатом для нас будет 100% заполнение монтажного отверстия, а, соответственно, и всей заданной прямоугольной области. Также задаем минимально допустимую высоту заполнения, например 75%, все, что ниже данного значения,



28
Результат применения стратегии с отчетом

будет считаться дефектом (красная линия на **рис 27**). Затем определяем еще ряд параметров, таких, например, как направление анализа (векторы на **рис 27**). Нам потребуется анализ и в горизонтальной области, так как помимо высоты заполнения монтажных отверстий припоем требуется контролировать и пустоты внутри него. Результат работы созданного алгоритма показан на **рис 28** с соответствующим отчетом обо всех выявленных дефектах.

Рассмотренный функционал рентгеновских установок microme | x DXR HD далеко не полный, но и этого достаточно, чтобы оправдать использование приставки «HD». Помимо изображения высочайшей четкости пользователи оборудования получают мощнейший инструмент для автоматизированного анализа изделий за счет самого современного программного обеспечения. С появлением такого функционала можно с уверенностью говорить, что охват задач полноценного контроля печатных узлов достиг своего сегодняшнего максимума. ▣