

Критерии выбора рентгеновской трубки

Рентгеновский контроль традиционно использовался для проверки качества сборки и поиска дефектов сборки печатных плат и изделий полупроводниковой промышленности. В последнее время преимущества рентгенографии приобрели еще большее значение, как для контроля качества изделий, так и для контроля технологического процесса. Все более частое использование компонентов BGA, CSP, флип-чипов приводит к необходимости внедрения рентгеновского контроля, потому что АОИ не может использоваться для проверки этих компонентов, так как их выводы скрыты под корпусами. В связи с этим рентгеновский контроль приобретает все большее значение для оценки качества протекания процесса на ранних, а не поздних и дорогостоящих этапах производства.

Дэвид Бернارد
(David Bernard)

d.bernard@dage-group.com

Перевод: Ольга Зотова

OlgaZotova@dipaul.ru

Введение

Когда рассматривается вопрос о приобретении системы рентгеновского контроля, то о ней иногда думают как о системе АОИ. Тем не менее, рентгеновский контроль абсолютно отличается от АОИ, и его нужно рассматривать совершенно в другом аспекте. В статье речь пойдет о двумерных (или 2D) системах

рентгеновского контроля и будет сделана попытка выделить ключевые моменты, на которые нужно обратить внимание, анализируя пригодность системы для выполнения той или иной задачи. Автор не будет говорить о трехмерных (3D) системах рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии.

Двумерная система рентгеновского контроля улавливает рентгеновские лучи, которые проходят через исследуемый образец, и переводит их в изображение, которое видит оператор. Объекты, находящиеся на исследуемом образце и сделанные из материала, плотность которого выше, чем плотность близлежащих объектов, поглощают больше рентгеновского излучения и отбрасывают тень на приемное устройство (рис. 1). Таким образом, например, припой и медные дорожки выглядят более темными по сравнению с ламинированной печатной платой. Достижение наилучшего результата рентгеновского контроля для той или иной задачи зависит от выбора пригодной для выполнения этой задачи системы рентгеновского контроля.

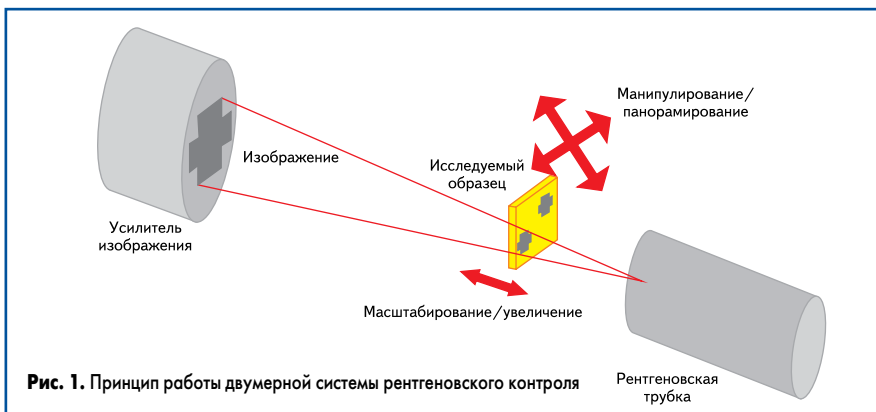


Рис. 1. Принцип работы двумерной системы рентгеновского контроля

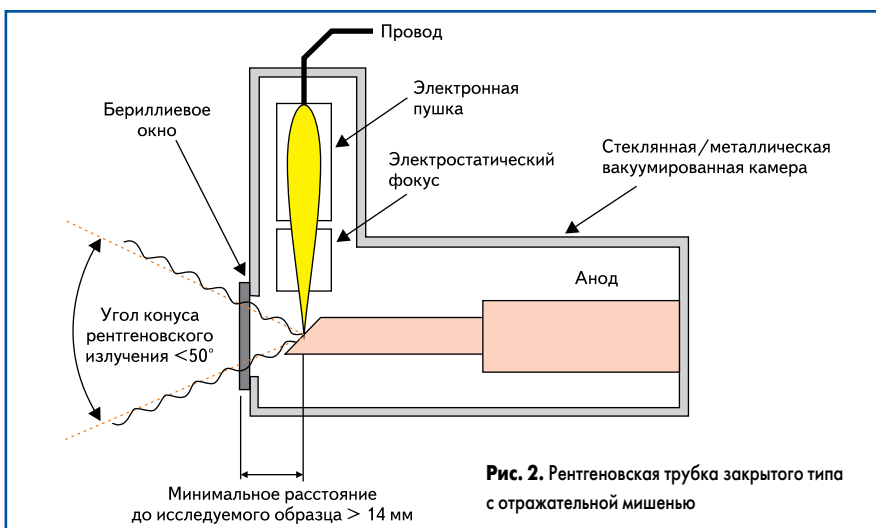


Рис. 2. Рентгеновская трубка закрытого типа с отражательной мишенью

Рентгеновские трубки открытого и закрытого типа

Неважно, о какой именно системе идет речь, неважно, какого именно производителя, но сердцем всех систем является рентгеновская трубка. Рентгеновская трубка — это устройство, излучающее рентгеновские лучи. В сущности, рентгеновская трубка — это цилиндр, в котором создан вакуум и в котором возникают электроны, ускоряемые напряжением, они и бомбардируют металлическую мишень. В результате бомбардирования электронами мишени и создаются рентгеновские лучи. Вакуум необходим в трубке для того, чтобы электроны могли достичь мишени и не рассеяться.

Традиционно в системах рентгеновского контроля использовались так называемые трубки закрытого типа (рис. 2), где вакуум создавался на заводе-изготовителе, после чего трубка запечатывалась, и ее нельзя было открывать. В последние годы

для контроля печатных плат и полупроводниковых изделий стали более популярны рентгеновские трубки открытого типа, или обслуживаемые трубки (рис. 3). Потому что они позволяют получить изображение большего разрешения с большим увеличением, а также потому, что их можно самостоятельно обслуживать (то есть в них есть доступ к изнашиваемым элементам: нити и мишени). Вакуум же в трубках открытого типа создается с помощью вакуумного насоса, поставляемого вместе с системой рентгеновского контроля.

Характеристики рентгеновских трубок

Ключевые характеристики рентгеновских трубок, определяющие их возможности (рис. 3):

- Нить или другое приспособление, которое производит электроны в трубке (иногда называется пушкой или прожектором). Обычно это термоэлектронная эмиссия от раскаленной нити. Чем больше электронов производит нить (а это зависит от проходящего через нее тока), тем ярче изображение.
- Фокусирующие элементы — это электромагнитные или другие элементы внутри трубки, которые «втискивают» ускорившиеся электроны в настолько маленькую точку на мишени, насколько это возможно. Эта точка на мишени называется фокальным пятном. Чем меньше фокальное пятно, тем лучше разрешение конечного изображения.
- Тип мишени — прострельная или отражательная. Если используется прострельная мишень, то, чтобы выйти из трубки и пробомбардировать исследуемый образец, рентгеновские лучи должны пройти сквозь эту мишень (рис. 3). Если используется отражательная мишень, то перед выходом из трубки рентгеновские лучи отражаются от поверхности мишени (рис. 2). Тип используемой в трубке мишени напрямую влияет на возможность увеличения изображения в системе рентгеновского контроля. Обратите внимание на то, что минимальное расстояние между исследуемым образцом и фокальным пятном существенно различается в трубках с различными типами мишеней: 0,5 мм и меньше в случае использования прострельной мишени, которая чаще всего стоит в трубках открытого типа, и примерно 15 мм — при использовании отражательной мишени, которая чаще всего стоит в трубках закрытого типа.
- Материал мишени и толщина этого материала. Это особенно важно для прострельной мишени, так как для коммерческого использования (то есть для повышения срока службы) нужна хорошая плотность потока рентгеновского излучения и в то же время несильное его поглощение при прохождении через мишень. Кроме того, если прострельные мишени становятся толще, то, во-первых, у электронов больше шансов увеличить фокальное пятно, а во-вторых, в результате возбуждения рентгеновские лучи создаются в толще мишени. Чаще всего для мишени используется вольфрам.

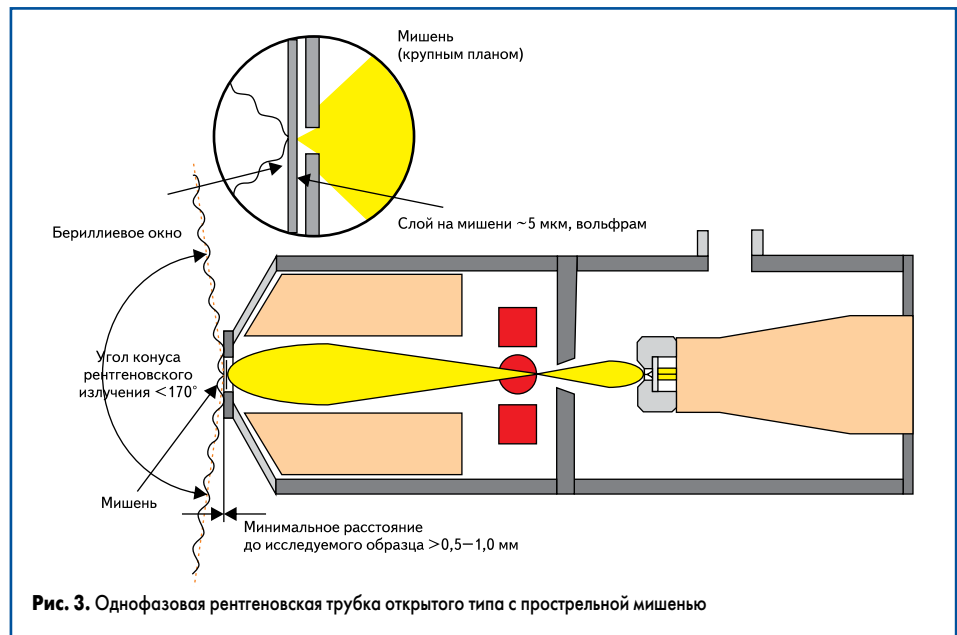


Рис. 3. Однофазовая рентгеновская трубка открытого типа с прострельной мишенью

- Ускоряющее напряжение электронов. Указывается в киловольтах (кВ). Чем выше значение в кВ, тем сильнее проникающая способность рентгеновских лучей. Это значит, что для получения изображения плотного или толстого объекта из менее плотного материала понадобится большее напряжение. При низком значении кВ можно работать с образцами из не очень плотного материала или с тонкими образцами. В противном случае проникающая способность рентгеновских лучей будет недостаточной для прохождения сквозь образец и удара о приемное устройство, то есть для формирования изображения.
- Мощность трубки. Измеряется в ваттах. Чем выше мощность, тем больше плотность потока рентгеновских лучей, а значит, ярче получаемое изображение.
- Вакуумное окно. Во всех рентгеновских трубках должен быть такой выход из вакуумированной трубки, который не разрушает вакуум. Самый часто применяемый способ — использовать диск из металлического бериллия для герметизации трубки и выхода рентгеновских лучей. Бериллий пропускает рентгеновские лучи с проникающей способностью, пригодной для рентгеновского контроля. Часто это называют «бериллиевым окном». Вместо бериллия можно использовать легкие металлы, например, алюминий, но часть рентгеновских лучей будет улавливаться этим материалом, а значит, изменять энергетический спектр производимого пучка.

Сравнение характеристик рентгеновских трубок

Если сравнить рентгеновские трубки и системы различных производителей, то станет понятно, что описанные выше характеристики будут отличаться, что скажется на качестве получаемого рентгеновского изображения. Именно поэтому следует обращать внимание на эти отличия, чтобы выбрать лучшую трубку и систему именно для той задачи, которая

стоит перед вами. Но, выбирая трубку, следует учесть соотношение характеристик трубки и всей системы рентгеновского контроля, чтобы обе были и надежными, и полностью пригодными для выполнения необходимых задач. Как будет показано дальше, существуют способы достичь максимального разрешения рентгеновского изображения, но, правда, ценой работы только с некоторыми образцами и в особых условиях. Такие решения могут быть приемлемы для некоторых лабораторий, но совершенно неприемлемы, например, для работы с большей частью печатных плат. При сравнении рентгеновских трубок/систем, первый выбор, который нужно сделать, — между трубкой открытого и закрытого типа.

Минимальные распознаваемые элементы изображения

Говоря о технических характеристиках систем, большинство производителей вместо термина «фокальное пятно» используют термин «минимальный распознаваемый элемент изображения». В нем учитывается влияние элементов, участвующих в формировании изображения, и различные элементы.

В трубках и открытого, и закрытого типа, чем меньше формируемое на мишени электроном фокальное пятно, тем лучше разрешение рентгеновской трубки. В идеальной ситуации рентгеновская трубка формирует бесконечно маленькое фокальное пятно. В этом случае получаются очень четкие изображения. В реальности фокальное пятно рентгеновской трубки не может быть бесконечно малым. Чем больше пятно, тем больше размыты контуры и больше ограничено разрешение получаемого изображения. Как показано на рис. 4, это особенно видно по контуру исследуемого объекта. В результате конечное изображение получается не очень четким.

Мощность трубки

В трубках и открытого, и закрытого типа с уменьшением размера фокального пятна существенно увеличивается плотность энергии на мишени. Например, если мощность трубки

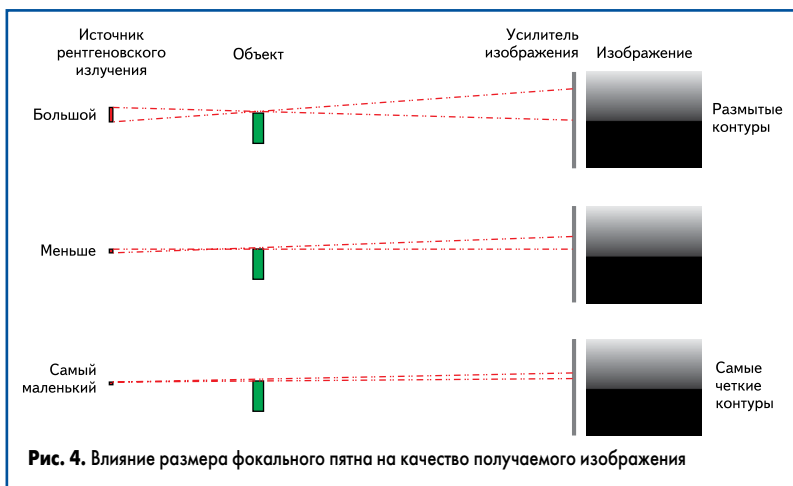


Рис. 4. Влияние размера фокального пятна на качество получаемого изображения

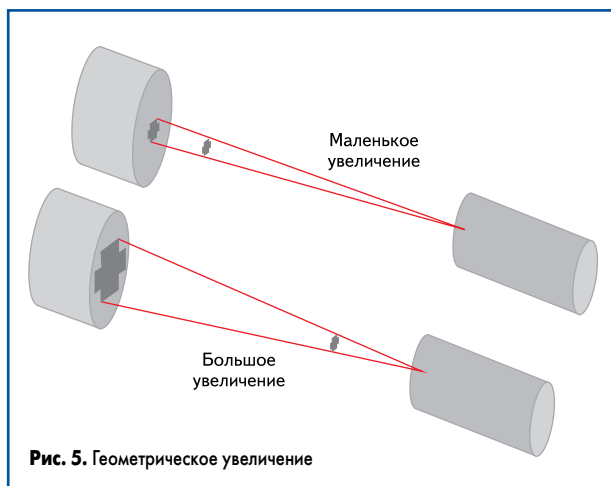


Рис. 5. Геометрическое увеличение

составляет 1 Вт на точку размером 1 микрон, то для получения такой же плотности энергии для фокального пятна в 20 микрон нужно 400 Вт. Хотя это значение и не кажется большим, но высокая плотность энергии при маленьком размере фокального пятна приводит к нагреву элементов системы, что необходимо устранять. Такое энергетическое воздействие приводит к изменению/разрушению поверхности мишени, в результате чего со временем мишень придется менять. Если мишень тонкая, например, если это просветная мишень, то изменение ее поверхности приведет к исчезновению «активного» слоя и необходимости проводить обслуживание мишени. Даже если мишень сделана из толстого материала, например, если это отражательная мишень, то изменение ее поверхности все равно произойдут, но гораздо позже, чем в случае с просветной мишенью, что также повлечет замену мишени. Широко используемые трубки закрытого типа нельзя обслуживать: если мишень или нить приходят в негодность, то меняют всю трубку целиком.

Плотность энергии на мишени — также одна из основных причин того, что размер фокального пятна в трубках закрытого типа составляет, в лучшем случае, 5 микрон (обычно 8–20 микрон) по сравнению с 1–2 микронами в трубках открытого типа. Из-за большой стоимости замены трубок в случае выхода из строя производители трубок закрытого типа вынуждены искать компромисс между размером фокального пятна и сроком службы трубки. Поэтому с течением времени характеристики установленной на заводе трубки закрытого типа с отражательной мишенью ухудшаются. Заводские технические характеристики действительно непродолжительное время с начала эксплуатации, хотя сама трубка может работать долго. В трубках же открытого типа доступ к сменным элементам (нити и мишени) не закрыт, поэтому восстановить их заводские характеристики очень просто.

Сравнивая технические характеристики трубок открытого и закрытого типа, мощность трубки нужно соотносить с размером фокального пятна. То есть для трубок закрытого типа часто заявляется гораздо большая мощность, чем для трубок открытого типа, но такая мощность достижима только при самом большом размере фокального пятна, которое форми-

руют эти трубки. Для работы же с печатными платами и полупроводниковыми изделиями всегда желательны маленькие размеры фокального пятна: из-за размеров объектов, с которыми приходится работать. Поэтому здесь правильнее будет выбирать трубку, учитывая и размеры объектов, которые будут исследоваться. Например, если размер формируемого трубкой фокального пятна составляет 20 микрон, а размер объекта, который нужно исследовать, — 25 микрон (например, золотая перемычка в корпусе компонента), то такая трубка абсолютно непригодна для этой цели. Размер же исследуемых элементов все время уменьшается, поэтому для проведения рентгеновского контроля понадобятся все меньшие размеры фокального пятна.

Для охлаждения производители предпочитают использовать в трубках воздух, а не воду, так как это проще и требует меньшего технического обслуживания. Эксплуатационные же преимущества воздушного охлаждения, тем не менее, ограничивают возможные размеры используемого фокального пятна и мощности трубки из-за ограничений теплообмена по сравнению с водным охлаждением.

Фокусировка и низкие значения напряжения

В трубках закрытого типа обычно используется одноэтапная фокусировка для формирования фокального пятна. В трубках открытого типа может использоваться одноэтапная или двухэтапная фокусировка. Трубки открытого типа с двухэтапной фокусировкой, возможно вместе с дополнительными апертурами, иногда называются нанофокусными трубками. Нанофокусные трубки отличаются еще большим разрешением по сравнению с обычными трубками открытого типа, потому что направленный на мишень поток электронов еще более сфокусирован и сжат. В результате формируется более узкое фокальное пятно, но, правда, за счет ограничения эксплуатационных качеств (смотрите ниже раздел, посвященный эксплуатационным характеристикам).

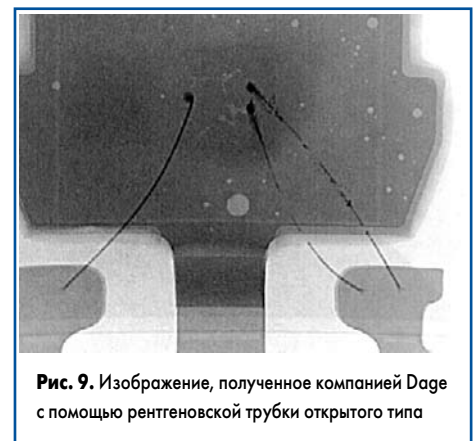
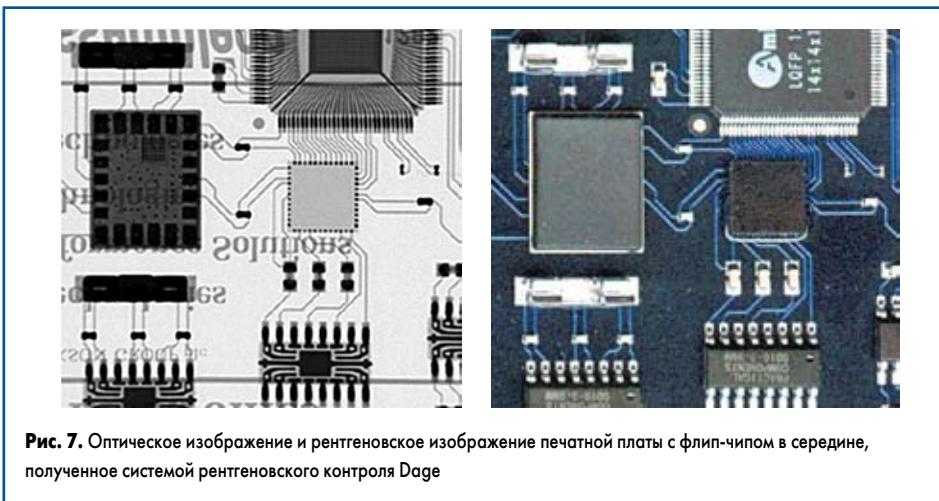
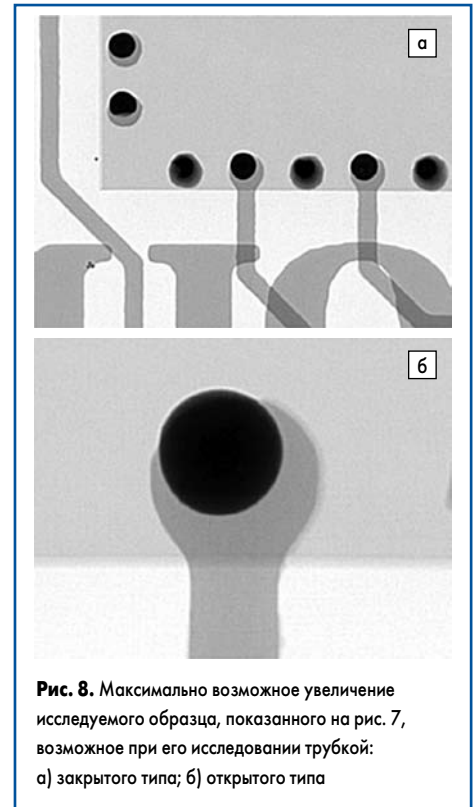
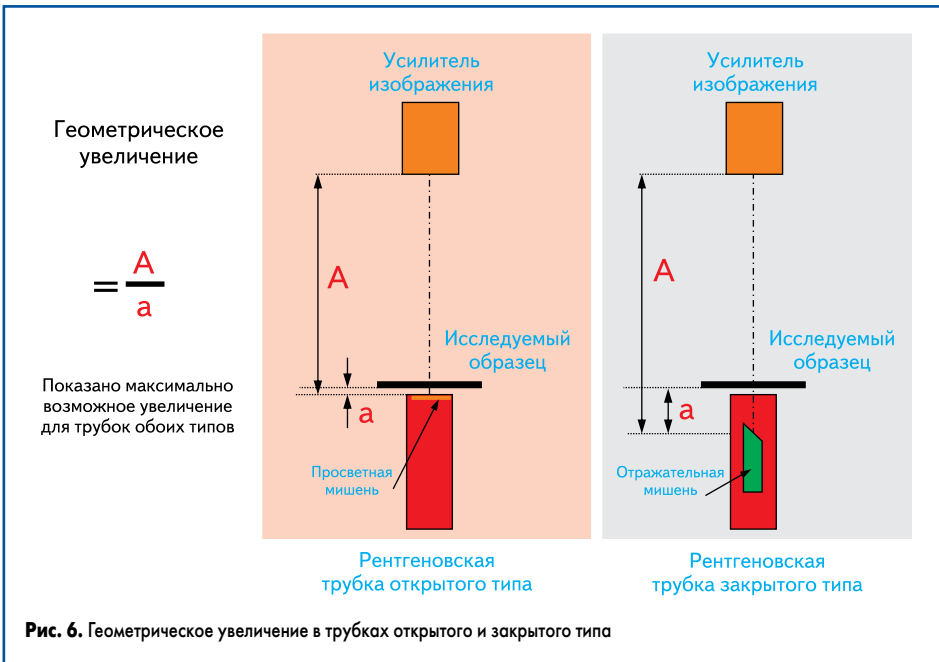
Неважно, как именно производится фокусировка, но чем меньший размер фокального пятна необходим, тем меньшее ускоряющее напряжение используется. Меньшее ускоряющее напряжение необходимо потому, что хотя электроны и фокусируются в небольшую

точку на мишени, они все-таки «расползаются» и формируют рентгеновские лучи на более широкой площади, то есть увеличивают фокальное пятно. Такое «расползание» уменьшается в просветных мишенях, потому что глубина тонкого слоя вольфрама ограничивает расползание электронов. В идеальной ситуации для просветных мишеней нужен бесконечно тонкий слой. В реальности же нужно искать компромиссную толщину, иначе мишень будет разрушаться очень быстро, и понадобится ее часто менять. В большинстве случаев работать с такой трубкой будет неудобно. Уже говорилось, что на просветной мишени слой тоже не может быть слишком толстым, так как часть лучей с низким напряжением будет поглощаться мишенью. Лучшим компромиссным решением при работе с печатными платами — использовать умеренный поток рентгеновского излучения с низким ускоряющим напряжением (кВ) и умеренным сроком службы трубки, в результате чего будут достигнуты оптимальные эксплуатационные параметры.

Увеличение

Используемые для рентгеновского контроля системы — это теньевые микроскопы (рис. 1). Геометрическое увеличение системы рентгеновского контроля — это соотношение расстояния от фокусной точки до устройства формирования изображения и расстояния от фокусной точки до исследуемого образца (рис. 5 и 6). При работе с печатными платами и полупроводниковыми изделиями в качестве устройства формирования изображения чаще всего используется усилитель изображения, который сменил используемую ранее рентгеновскую пленку.

Из-за особенностей конструкции рентгеновской трубки закрытого типа фокусная точка в таких трубках должна быть удалена от выхода трубки из-за изоляции, необходимой для работы с ускоряющим напряжением в 10 кВ между анодом и катодом. Это приводит к большому минимальному расстоянию, на которое исследуемый образец может быть приближен к фокусной точке трубки закрытого типа (обычно это 15 мм и больше, рис. 2 и 6), если сравнивать с трубкой открытого типа. Если используется трубка открытого типа с просветной мишенью, то исследуемый образец можно положить на окно трубки



на расстоянии 0,25–0,5 мм от фокального пятна (рис. 3 и 6). Такие различия напрямую влияют на возможности увеличения.

Давайте рассмотрим пример. Если взять трубку открытого и закрытого типа и установить их в одну и ту же систему рентгеновского контроля, то расстояние между фокальным пятном и изображением на устройстве формирования изображения будет одинаковым для обеих трубок, например 350 мм. При этом максимальное геометрическое увеличение трубки закрытого типа будет 350/15 или ~23х. (Предположительно, минимальное расстояние от фокального пятна до исследуемого образца составляет 15 мм.) Для трубки открытого типа с минимальным расстоянием от фокального пятна до образца 0,25 мм максимальное геометрическое увеличение составит 350/0,25 или ~1400х.

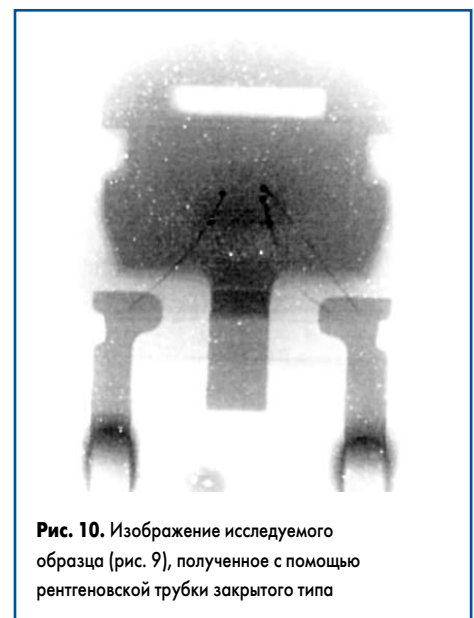
Разницу возможностей увеличения трубок открытого и закрытого типов можно увидеть на рис. 7 и 8. На рис. 7 показано оптическое изображение тонкой платы с флип-чипом диаметром 6,35 мм в середине. Ниже показано рентгеновое изображение этой же платы. Обратите внимание на то, что ранее скрытые соединения флип-чипа и других компонентов видны.

На рис. 8 для получения изображений соединений флип-чипа использовалась трубка открытого типа (рис. 7). Исследуемый образец был положен в рентгеновской системе на оснастку таким образом, чтобы он находился как можно ближе к фокусной точке, насколько это возможно при работе с трубкой открытого и закрытого типа, то есть 0,5 мм плюс толщина оснастки для трубки открытого типа и ~15 мм, плюс толщина оснастки для трубки закрытого типа. Разница увеличения очевидна. Диаметр шарика на рис. 7 — 189 мкм.

На рис. 8 не показана разница в качестве изображений, которая возникает при работе с трубками закрытого типа. Оба изображения получены компанией Dage с помощью трубки открытого типа. Чтобы имитировать условия работы с трубкой закрытого типа, расстояние от фокального пятна до образца было настроено на изображении слева. Но разницу можно увидеть на рис. 9 и 10: здесь показан один и тот же исследуемый образец, изображение которого получено с помощью трубок закрытого и открытого типа.

Если сравнивать изображение, полученное с помощью трубки открытого типа (рис. 9), и изображение, полученное с помощью рентгеновской трубки закрытого типа (рис. 10),

то на последнем трудно увидеть повреждения золотых перемычек. Кроме того, рентгеновская трубка открытого типа позволяет сильнее



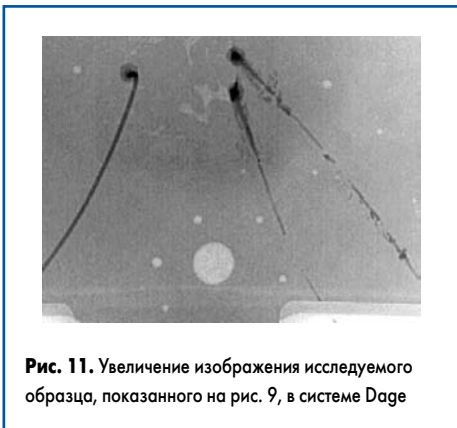


Рис. 11. Увеличение изображения исследуемого образца, показанного на рис. 9, в системе Dage

увеличить изображение, чтобы можно было тщательнее исследовать перемычки на предмет повреждений (рис. 11).

Так как геометрическое увеличение зависит от расстояния от фокального пятна до устройства формирования изображения, то может показаться, что увеличение этого расстояния улучшит технические характеристики системы. Хотя геометрическое увеличение и станет больше по значению, в этом случае придется смириться с существенным ослаблением интенсивности потока рентгеновского излучения и удара электронов об устройство формирования изображения. Поток рентгеновского излучения будет уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния. Таким образом, если увеличить расстояние от фокального пятна до устройства формирования изображения в два раза, то интенсивность потока электронов и их удара о приемное устройство уменьшится в четыре раза. Поэтому производители вынуждены искать компромисс между приемлемыми для работы размерами оборудования, которое можно будет втиснуть в дверной проем и т. д., и возможностью быстрого получения качественного изображения без необходимости долго ждать, пока усредненный сигнал преодолит снижение интенсивности потока электронов.

Иногда производители заявляют о максимальном увеличении, возможном в их системах, объединяя геометрическое увеличение и увеличение цепочки элементов, участвующих в формировании изображения и выводе изображения на мониторе. Это называется системным или полным увеличением. Геометрическое увеличение позволяет точнее сравнить системы рентгеновского контроля, чем общее увеличение, так как вывод конечного изображения на большой монитор повышает общее увеличение изображения, но не меняет геометрическое увеличение и не повышает разрешение или другие характеристики изображения.

Яркость нити

Рентгеновские трубки созданы таким образом, чтобы фокусировать на мишени созданное на нити электронное облако. Величина проходящего через нить тока в трубке открытого типа влияет на количество излучаемых электронов. А это, в свою очередь, влияет на количество электронов, ударяющихся о мишень, а значит, влияет на яркость конечного

рентгеновского изображения. Из этого можно предположить, что толстая нить сможет работать с более высоким током накала, вырабатывать больше электронов и отличаться большим сроком службы. На самом же деле, чтобы достичь максимальной термоэлектронной эмиссии и создать концентрированное облако электронов, направленных с ускорением в минимально возможную фокусную точку, в трубке открытого типа для нити стандартно используется «петля» из тонкой (обычно вольфрамовой) проволоки. Это автоматически ограничивает ток накала, при котором может работать нить, не разрушаясь очень быстро. Если использовать проволоку большего диаметра и менее заостренную форму петли, то сила тока накала нити увеличится, но за счет формируемого фокального пятна.

Эксплуатационные характеристики

Производители из всех сил стараются уменьшить размеры фокального пятна, используя описанные выше приемы, чтобы угодить за все уменьшающимися размерами компонентов, но за это приходится платить. Например, с уменьшением размеров фокального пятна существенно уменьшается поток рентгеновского излучения, в результате чего получается тусклое изображение и придется прибегать к более продолжительному «облучению», чтобы получить изображение приемлемого качества. Поэтому если на то, чтобы получить изображение самого высокого разрешения, уходит много времени, то это может быть непрактично, за исключением случаев использования системы в сугубо научных целях, где требуется особое внимание к процессу получения данных каждого измерения. Кроме того, если получение изображения длится в течение нескольких минут и больше, то вибрация системы рентгеновского контроля может отрицательно сказаться на разрешении трубки, если не использовать какие-то дополнительные приспособления/условия для работы. Поэтому использование самого высокого разрешения может быть нецелесообразным на производственном участке, а пригодным только для проведения испытаний.

Если использовать самое низкое ускоряющее напряжение (кВ), то, чтобы добиться наилучшего разрешения, придется ограничивать типы исследуемых образцов. Обычно наилучшее разрешение изображения получается при использовании в трубке напряжения менее 50 кВ. Если исследуемый образец не очень плотный и/или тонкий, то такое ускоряющее

напряжение в этих условиях будет приемлемым. Но обычно при работе с печатными платами такие условия не выполнимы, потому что сами платы отличаются достаточной плотностью для поглощения большей части (если не всех) лучей.

Стандартный корпус компонента также может поглощать рентгеновские лучи, что приводит к невозможности проведения качественного анализа при таком разрешении, не прибегая к необходимости как-то изменять исследуемый образец. Таким изменением может быть: демонтаж компонента с печатной платы, снятие корпуса, изменение толщины образца и т. д. Учитывая все это, исследователь понимает, что использование рентгеновских трубок с очень высоким разрешением ограничивается только лабораториями анализа причин отказов, где можно уделять больше внимания каждому отдельному исследуемому образцу. Но в реальных производственных условиях для контроля качества изделий и технологического процесса из-за ограничений по времени столь тщательный анализ образца не производится. Поэтому перед приобретением системы рентгеновского контроля будет правильно решить, какие нужны технические характеристики трубки для планируемого применения системы.

Некоторые производители прибегают к дальнейшему снижению толщины мишени для уменьшения фокального пятна и улучшению геометрического увеличения. Но в этом случае тонкая мишень будет быстрее разрушаться направленным пучком электронов, а значит, ее нужно будет чаще менять. Это может быть приемлемо для лаборатории, где можно соблюдать особые условия работы, но совершенно непригодно для производства.

Заключение

В поставляемых системах рентгеновского контроля могут быть трубки различной конструкции, причем каждый тип трубки пригоден для выполнения определенной задачи (таблица). Трубки закрытого типа представляют собой необслуживаемую конструкцию с достаточно длительным сроком службы (по сравнению с трубками открытого типа), но заводские технические характеристики достижимы только в начале срока службы этих трубок. Трубки закрытого типа также позволяют достичь меньшего разрешения и увеличения изображения по сравнению с трубками открытого типа. Затраты на замену расходных материалов

Таблица. Характеристики рентгеновских трубок открытого и закрытого типа

Характеристики	Трубка закрытого типа	Трубка открытого типа однофазная	Трубка открытого типа двухфазная
Минимальные распознаваемые элементы изображения	5 мкм и больше	2 мкм	< 1 мкм
Максимальное напряжение в трубке, кВ	90, 150	160	100, 160
Обслуживаемость	Нет	Да	Да
Увеличение	Маленькое	Большое	Большое
Стоимость владения*	Средне-высокая	Низкая	Низкая
Толщина мишени	Большая	~5 мкм	2–3 мкм

Примечание. * — исходя из срока эксплуатации трубки закрытого типа в 10 000 часов.

(нити и мишени) в трубке открытого типа с заменой всей трубки закрытого типа несопоставимы. Поэтому стоимость владения системой рентгеновского контроля с трубкой закрытого типа будет намного выше.

В трубке открытого типа можно повысить разрешение за счет уменьшения фокального пятна на мишени с помощью всех или некоторых из указанных выше способов. Конечное разрешение, которое можно достичь с помощью трубки открытого типа, может быть в 5 раз выше, чем самое высокое разрешение трубки закрытого типа (1 микрон и меньше).

За это приходится расплачиваться тем, что получить такое разрешение можно, лишь соблюдая некоторые условия и зачастую используя только специально подготовленные образцы. Это может быть непригодным для выполнения большинства задач. Поэтому большинство производителей трубок открытого типа жертвуют техническими характеристиками своих трубок (при этом разрешение все равно выше в 3–4 раза по сравнению с трубками закрытого типа), но сохраняют устойчивость системы для надежной работы в реальных производственных условиях.

Хотя в этой статье уделялось большое внимание размеру фокального пятна, стоит также отметить, что на разрешение конечного изображения, полученного системой рентгеновского контроля, влияет и разрешение устройства формирования изображения и качество работы устройства обработки изображения, если речь идет о цифровых системах. ■

Литература

1. Kerridge. B. Sharpen x-ray images. Test & Measurement Europe. Jan 2002.