

# Способы уменьшения мощности дозы рентгеновского излучения на исследуемые компоненты

**Во время рентгеновского контроля на исследуемый образец воздействует ионизирующее излучение фотонов высокой энергии, а значит, образец получает дозу облучения. Некоторые устройства чувствительны к воздействию ионизированного излучения. И из-за чувствительности этих устройств к излучению пользователь может быть вынужден принимать во внимание величину ионизирующего излучения во время рентгеновского контроля изделий, чтобы не превысить допустимые пороговые значения.**

**Давид Бернارد**  
(David Bernard)

d.bernard@dage-group.com

**Ричард С. Блиш**  
(Richard C. Blish)

richard.blish@amd.com

**Перевод: Ольга Зотова**

OlgaZotova@dipaul.ru

## Введение

В статьях [1–3] поднимались вопросы размера доз излучения, воздействующего на компоненты во время их рентгеновского контроля. Доза излучения зависит от количества энергии, передаваемой в единичную массу исследуемого материала. Единица измерения дозы излучения — Гр (грей) = 1 Дж/кг = 100 рад. Термин «мощность дозы излучения» используется для обозначения дозы излучения за единицу времени (например, Гр/мин или рад/мин), которой подвергнется исследуемое устройство в данном положении в результате воздействия источника излучения (в данном случае источника рентгеновского излучения в системе рентгеновского контроля). Если умножить мощность дозы излучения на время нахождения исследуемого образца в месте воздействия излучения, то получим размер дозы излучения на этот образец. При очень больших дозах излучения (когда порядок величины больше, чем тот, который может быть достигнут при рентгеновском контроле) энергия скапливается, например, на кремниевом кристалле, что приводит к физическому разрушению устройства, а значит, и его отказу. Для производителя и пользователя полупроводниковых устройств опасность дозы излучения во время рентгеновского контроля заключается не в полном разрушении устройства, так как, во-первых, здесь отказы вполне очевидны, и, во-вторых, при рентгеновском контроле на производстве такого уровня дозы излучения достичь практически невозможно, а в частичном повреждении устройства, например, в битовой обработке, потере программы и стирании информации, утечке и т. д., когда отказ устройства становится делом случая, а физические повреждения не заметны. Трудность работы с такими случайными отказами в коммерческой продукции заключается в том, что они возникают при дозах излучения на порядок ниже разрушительных, то есть в диапазоне доз излучения, используемых при проведении рентгеновского контроля.

Но прежде чем прийти к выводу, что рентгеновский контроль опасен для всей коммерческой продукции, следует сказать, что:

- Некоторые устройства более чувствительны к излучению, чем другие, но на подавляющее большинство устройств рентгеновское излучение не влияет отрицательно [4].
- Фактические пороговые значения излучения в таких случаях очень трудно определить.

На самом деле приводимые в литературе значения отличаются друг от друга на порядок [1, 4] (табл. 1), и поэтому могут быть очень далеки от реальных значений в большинстве используемых систем рентгеновского контроля, а значит, и не быть опасными.

**Таблица 1.** Примерные пороговые значения суммарной дозы излучения, при которой возможно появление неполадок, для различных типов коммерческих полупроводниковых устройств [4].

Тип полупроводникового устройства	Общее пороговое значение, рад (СИ)	Общее пороговое значение, рад (СИ)
Линейное	2000–50 000	20–500
Цифро-аналоговое	2000–30 000	20–300
Флэш-память	5000–15 000	50–150
Динамическая память	15 000–50 000	150–500
Микропроцессоры	15 000–70 000	150–700

По определению случайное возникновение проблемы подразумевает, что если допустимый порог превышен, то это еще не значит, что проблема возникнет или не возникнет в том или ином устройстве на той или иной плате. Превышение порогового значения означает лишь то, что возрастает вероятность возникновения неполадки (неполадок) в партии изделий (или всей серии) с данным устройством.

Если для каких-то устройств на плате существует потенциальный риск, то до проверки этого устройства нужно примерно высчитать дозу излучения, которой будет подвергнуто это устройство. Для этого нужно следующее:

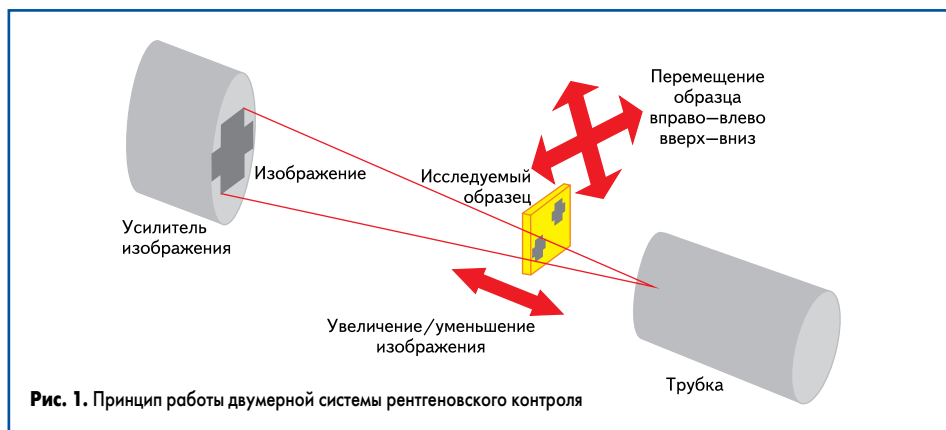


Рис. 1. Принцип работы двумерной системы рентгеновского контроля

• Понимание и измерение уровня излучения, воздействующего на каждое устройство в системе рентгеновского контроля во время различных этапов инспекции.

• Знание суммарного времени нахождения устройства под воздействием излучения той или иной мощности. Это позволит вычитать общую дозу излучения для каждого устройства в ходе выполнения всей процедуры и сравнить полученное значение с допустимыми пороговыми значениями. Также следует помнить о том, что в полупроводниковых устройствах излучение имеет тенденцию накапливаться [5]. Поэтому повторение инспекции приведет к удвоению дозы излучения в устройстве. Таким образом, инспекция, обычно проводимая после ремонта, может привести к повреждению чувствительных элементов на плате. Также следует обратить внимание на то, что устройства из арсенида галлия менее подвержены повреждениям после излучения, чем кремниевые устройства [1].

Измерение дозы излучения и влияние этого излучения на компоненты всегда вызывало беспокойство у производителей аэрокосмической и военной продукции, что привело к созданию устройств, защищенных от радиоактивного излучения. Такие устройства выдерживают излучение гораздо большей мощности, чем их коммерческие аналоги. Но толчком для написания этой статьи послужила потенциально возможная опасность повреждения интегральных схем во время рентгеновского контроля поверхностно-монтируемых устройств, особенно тех, которые способны накапливать излучение, что приводит к их дальнейшему повреждению.

Атака на башни-близнецы в США открыла новые возможности использования рентгеновских и связанные с ними трудности. Во-первых, в аэропортах была предпринята попытка по возможности увеличить частоту и интенсивность оборудования для проверки багажа и ручной клади пассажиров. Во-вторых, Почтовая служба США предприняла попытку стерилизовать почту [6] и посылки, отправляемые с адресов с выбранными почтовыми индексами для борьбы с рассылкой спор сибирской язвы. Применяемые Почтовой службой США дозы настолько высоки (5–10 Мрад при использовании луча мощностью 10 мегаэлектронвольт и сотен киловатт!), что никакое коммерчески используемое устройство

(табл. 1 из [4]) и даже радиационно-устойчивое устройство не выдержит их.

Во время изучения воздействия излучения было обнаружено, что в системах рентгеновского контроля различных поставщиков мощность рентгеновского излучения, воздействующего на исследуемые образцы, очень сильно различается [2, 3]. Хотя данные различных поставщиков и учитывают различные критерии оценки дозы излучения, эти различия привели к возникновению следующего вопроса: как пользователи полупроводниковых устройств могут снизить дозу излучения во время проведения инспекции?

Системы рентгеновского контроля — это в принципе теньевые рентгеновские микрографы (рис. 1). Источник рентгеновского излучения (рентгеновская трубка) производит рентгеновские лучи, проникающие сквозь исследуемый образец. Материалы, из которых сделан образец, поглощают больше или меньше рентгеновского излучения в зависимости от плотности и атомного числа и отбрасывают тень на приемное устройство. Чем выше плотность материала, тем темнее отбрасываемая тень. Чем ближе исследуемый образец к рентгеновской трубке, тем больше тень. Именно так и увеличивается изображение. На дозу излучения влияют следующие параметры:

- Расстояние между исследуемым образцом и источником рентгеновского излучения.
- Используемая мощность рентгеновской трубки.
- Наличие/отсутствие фильтров (поглощающий рентгеновские лучи материал) между трубкой и образцом.
- Повторение инспекции.

#### Мощность дозы излучения и расстояние

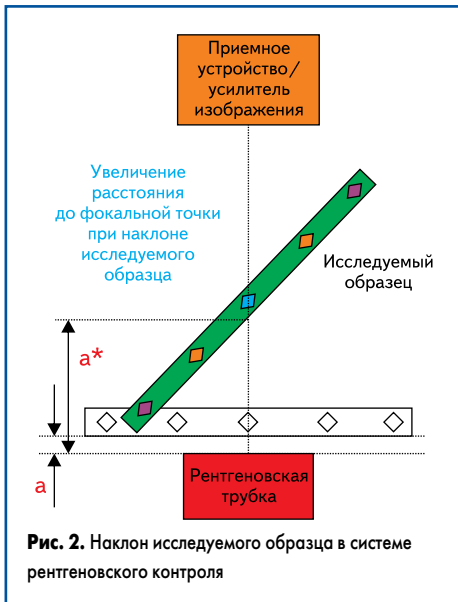
Мощность дозы излучения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Другими словами, если увеличить в 2 раза расстояние от первоначальной точки измерения мощности дозы излучения, то мощность дозы излучения уменьшится в 4 раза от первоначальной. Если увеличить расстояние в 3 раза, то мощность дозы излучения уменьшится в 9 раз и т. д. Таким образом, расстояние от чувствительного устройства до фокальной точки (источника рентгеновских лучей) во время инспекции будет существенно влиять на мощность дозы излучения на эти устройства.

Чтобы сократить мощность дозы излучения, можно просто не подносить исследуемый образец близко к источнику излучения. Но хотя это и хороший совет для снижения мощности дозы излучения, необходимость в увеличении изображения становится все более актуальной в связи с уменьшением размеров исследуемых объектов. То есть образцы все равно приходится приближать к источнику рентгеновского излучения. Поэтому во время проведения инспекции некоторых образцов необходимо искать компромиссное решение. Особенно актуальна проблема поиска компромисса при работе с рентгеновскими трубками открытого типа (обслуживаемой трубкой), которые в последние годы стали чаще использоваться в системах рентгеновского контроля полупроводниковых изделий и печатных плат вместо рентгеновских трубок закрытого типа. О разнице между этими типами трубок можно прочитать в статье [7], но если говорить коротко, то основное отличие заключается в том, что у трубок открытого типа разрешение выше, чем у трубок закрытого типа. Выше же разрешение благодаря тому, что, работая с трубкой открытого типа, исследуемый образец можно гораздо ближе поднести к фокальной точке.

Например, если в системе рентгеновского контроля установлена трубка открытого типа, то в ней исследуемый образец можно поднести на расстояние 0,5 мм (и меньше) до фокальной точки. Если же установлена трубка закрытого типа, то минимальное расстояние до фокальной точки составляет 15 мм и больше. Таким образом, если предположить, что мощность излучения обеих рентгеновских трубок одинакова, то на расстоянии 0,5 мм от источника излучения мощность дозы излучения будет примерно в 900 раз больше, чем на расстоянии 15 мм. Это связано с тем, что расстояние в 15 мм больше расстояния 0,5 мм в 30 раз. Но это крайний случай.

Толщина корпуса сразу же отдаляет чувствительный кремниевый кристалл внутри компонента по крайней мере на 0,5 мм от источника излучения, из-за чего разница в значении мощности дозы излучения открытой и закрытой трубки изменится до 210 раз. При этом не учитывается поглощение рентгеновских лучей материалом корпуса компонента, что уменьшает мощность дозы излучения. Но так как корпуса компонентов обычно производятся из материала с низкой плотностью, то на самом деле затухание будет слабым, и его можно игнорировать при определении мощности дозы излучения. Если к расстоянию до фокальной точки добавить толщину держателя/поддона с исследуемым образцом (примерно 1 мм), который обычно используется в системах рентгеновского контроля, то разница в значениях мощности дозы излучения обеих типов трубок уменьшится примерно до 50. Это последнее число, пожалуй, является более реальным верхним пороговым значением, демонстрирующим разницу мощности дозы излучения трубки открытого и закрытого типа.

После оценки геометрии устройства нужно определить, какие участки устройства будут дальше от источника излучения, а значит, по-

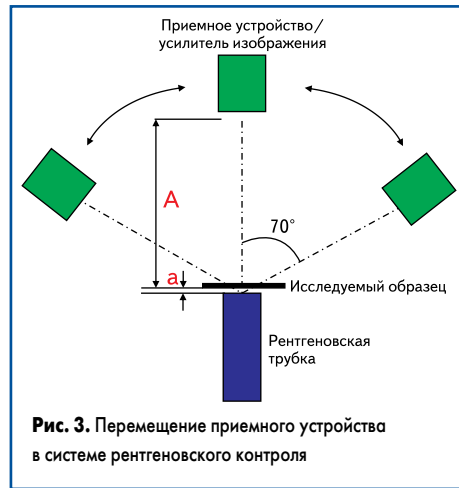


**Рис. 2.** Наклон исследуемого образца в системе рентгеновского контроля

лучат гораздо меньшую дозу излучения. Таким образом, при высчитывании реальной дозы излучения нужно учитывать, инспекция каких участков будет проводиться при максимально возможном увеличении, а не предполагать, что все устройство получит максимальную дозу излучения. Это поможет уменьшить общую дозу излучения, воздействующего на проверяемое устройство. Тем не менее, также нужно помнить, что если устройство находится на печатной плате или поддоне с похожими устройствами, то на суммарную дозу также будет влиять общее время облучения устройства, включая инспекцию и других устройств. А это значение может быть существенным, даже если устройство находится на достаточно большом расстоянии от источника излучения.

Кроме того, что мощность дозы излучения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, мощность дозы также изменяется прямо пропорционально углу наклона пучка рентгеновских лучей относительно исследуемого образца. Поэтому, если исследуемый образец наклонен относительно пучка рентгеновских излучений для получения косой проекции на приемном устройстве, то мощность дозы излучения будет уменьшена. Это может быть важным замечанием, потому что возможность изучения образцов под углом очень полезна, особенно при работе с компонентами BGA и другими матричными устройствами. Это связано с тем, что из-за формы выводов в виде шара исследование паяных соединений под прямым углом затруднено (то есть как в обычных рентгенах).

Исследование образца под углом помогает преодолеть это ограничение и обнаружить отсутствие контактов после оплавления припоя. Если наклонить исследуемый образец, то технически можно предположить, что мощность дозы облучения чувствительного устройства, например кремниевого кристалла, будет неравномерной по его длине и будет уменьшаться по мере удаления от источника излучения. Возникает вопрос: не будет ли риска для одних участков исследуемого устройства, в то время как для других такого риска нет?. Но чтобы не усложнять ситуацию и избежать ошибки



**Рис. 3.** Перемещение приемного устройства в системе рентгеновского контроля

во время расчета опасной мощности дозы излучения, можно предложить использовать максимальную мощность дозы излучения в точке, ближайшей к источнику излучения.

Любое возможное уменьшение мощности дозы излучения в связи с наклоном рентгеновских лучей также можно игнорировать, потому что за последние годы системы рентгеновского контроля эволюционировали. Поток лучей стал менее склонен к рассеиванию при проведении исследования объектов под углом. Эта необходимость была вызвана уменьшением размеров исследуемых объектов.

Ранее в системах рентгеновского контроля для наклона исследуемого образца его отодвигали от фокальной точки рентгеновской трубки, чтобы предотвратить удар образца об элементы системы. В результате ограничивались возможности увеличения изображения. Сегодня производители систем рентгеновского контроля предпочитают держать исследуемый образец все время перпендикулярно фокальной точке и формировать изображение под углом, перемещая приемное устройство. При наклоне исследуемого образца (рис. 2) он удаляется от трубки рентгеновского излучения для предотвращения столкновения образца с трубкой. В результате увеличивается расстояние от фокального пятна до образца, а значит, существенно сокращается допустимое увеличение изображения. При перемещении приемного (рис. 3) устройства для инспекции образца под углом сам исследуемый образец остается в горизонтальном положении, поэтому в этом случае не нужно жертвовать возможностями увеличения изображения.

Таким образом, чтобы получить изображение под углом не нужно жертвовать возможностями увеличения изображения и ограничивать возможности проведения контроля. Это также означает, что в этом случае при наклоне лучей и большом расстоянии до исследуемого образца нет одного значения уменьшения мощности дозы излучения, поэтому нужно компенсировать мощность дозы.

### **Мощность дозы излучения и мощность трубки рентгеновского излучения**

Мощность дозы излучения также зависит и от мощности рентгеновской трубки. Мощность высчитывается из произведения

ускоряющего напряжения, используемого для того, чтобы заставить электроны ударяться о мишень (кВ), и тока в нити, которая производит эти электроны. Значение кВ также используется для измерения проникающей способности рентгеновских лучей. Чем выше используемое значение кВ, тем выше проникающая способность создаваемых рентгеновских лучей. Эти параметры используются для настройки работы трубки рентгеновского излучения и для получения в приемном устройстве изображений с хорошим контрастом. Мощность дозы излучения примерно прямо пропорциональна мощности трубки, поэтому, например, если удваивается мощность, то удваивается и мощность дозы излучения. Чем выше мощность, тем ярче источник. Тем не менее, существуют технические ограничения максимальной мощности трубки рентгеновского излучения [7], но чем больше используемая мощность, тем меньше будет время проведения инспекции, так как быстрее достигается пороговое значение. Как сказано выше, не важно, какая рентгеновская трубка используется (режим проведения инспекции может отличаться в зависимости от типа проверяемого устройства и типа проводимой инспекции). При повторе инспекции доза излучения, воздействующего на устройство, удваивается.

### **Мощность дозы излучения и фильтрация пучка рентгеновских лучей**

Техника проведения рентгеновского контроля предписывает, что для получения изображения пучок рентгеновских лучей должен поглощаться под разными углами материалами разной плотности. Кроме ослабления силы пучка рентгеновских лучей при прохождении через материал, также происходит изменение спектра рентгеновского излучения. Это можно использовать для существенного уменьшения дозы излучения, воздействующей на исследуемые объекты. Например, материал печатной платы или корпуса компонента может «защищать» чувствительный кремний за счет фильтрации рентгеновских лучей. Намеренное использование дополнительной фильтрации за счет добавления какого-то материала непосредственно перед исследуемым образцом также помогает при работе с чувствительными изделиями [3]. Это достигается благодаря оптимизации контраста некоторых материалов на исследуемом образце, например меди, используемой в качестве дорожек на печатной плате, и оловянно-свинцового припоя (или бессвинцового припоя), используемого для паяных соединений, без увеличения дозы излучения, воздействующего на кремний.

Дозу излучения можно существенно уменьшить без ухудшения качества изображения с помощью подходящих фильтров. В источниках [2, 3] показано, что оптимальный фильтр для рентгеновского контроля должен в идеальной ситуации иметь атомное число в диапазоне  $Z = 30-35$ , что немного больше,

чем у Cu ( $Z = 29$ ). Так как чувствительные компоненты на изделии обычно сделаны из кремния ( $Z = 14$ ), то в источниках [2, 3] показано, что лучшими характеристиками для работы с полупроводниками и печатными платами обладает цинк (Zn). Это связано с тем, что профиль поглощения рентгеновских лучей блокирует рентгеновские лучи низкой энергии, что увеличивает дозу излучения, воздействующую на кремний, но не улучшает качество изображения, а значит, защищает кремний. Тем временем медные дорожки и свинцово-оловянные (или бессвинцовые) припои (Sn  $Z = 50$  и Pb  $Z = 82$ ) на печатной плате отображаются хорошо при использовании рентгеновских лучей высокой энергии (обычно такие лучи есть в системах рентгеновского контроля).

В [3] указано, что толщина цинковой фольги в 300–400 мкм полностью защитит большую часть чувствительных к излучению элементов. На практике же это, тем не менее, существенно уменьшает поток рентгеновского излучения через исследуемый образец, в результате чего получаются изображения с низкой контрастностью. Также для получения изображений в этом случае требуется больше времени. Компромиссным решением может быть использование в качестве фильтра листа цинка толщиной примерно 100–150 мкм. Это уменьшит дозу излучения, воздействующую на чувствительные элементы, примерно в 100 раз [3], в то время как изменения яркости и контраста получаемых рентгеновских изображений будут менее выражены, а значит, современные рентгеновские системы смогут их обработать и выдать пригодные для анализа изображения.

### Оценка/высчитывание мощности дозы излучения во время проведения рентгеновского контроля

На рынке существует множество различных конструкций рентгеновских трубок открытого и закрытого типа. А значит, существует множество вариантов того, насколько близко исследуемый образец можно поднести к фокальной точке при работе с той или другой рентгеновской трубкой (что является самым важным фактором, влияющим на мощность дозы излучения, воздействующего на исследуемый образец).

Производители систем рентгеновского контроля должны предоставлять данные о своих системах рентгеновского контроля, которые будут отображать зависимость мощности дозы излучения от расстояния до фокальной точки при различной мощности рентгеновской трубки (для каждой конкретной системы). Затем можно высчитать мощность дозы излучения во время проведения инспекции, исходя из этих данных и следующих условий:

- Расстояние от фокальной точки рентгеновской трубки до чувствительных к излучению компонентов на каждом этапе проведения инспекции.
- Использование корректирующих значений для «подгонки» данных производителем значений мощности дозы излучения к тем значениям кВ, которые используются на каждом этапе проведения инспекции.

• Определение примерной продолжительности каждого этапа инспекции, проводимой при указанных выше условиях.

- Корректировка мощности дозы излучения при использовании дополнительных фильтров для изменения пучка рентгеновских лучей.

Суммарная мощность дозы излучения высчитывается исходя из суммы мощности всех доз излучения, воздействующего на компоненты на каждом этапе инспекции. При этом игнорируется дополнительная фильтрация излучения, например, материалами печатной платы или корпусов. Тем не менее, такой подход позволяет определить примерную верхнюю границу мощности дозы излучения, которая возможна при проведении контроля. Затем полученное значение можно сравнить с критическими пороговыми значениями, которые допустимы при работе с данным изделием. Чтобы перепроверить эти данные, рекомендуется измерить мощность дозы излучения на плате-макете.

К сожалению, напрямую измерить излучение невозможно. Любое измерение излучения требует вмешательства в естественную среду измерения, после чего данные собираются и калибруются относительно известных значений. Например, при излучении может происходить ионизация среды (воздуха) в объеме камеры. Таким образом, степень ионизации можно измерить как заряд или ток, а затем откалибровать полученное значение относительно известных значений мощности доз (ы) излучения. Тем не менее, получаемые значения зависят от используемой среды получения данных. Также необходимы коэффициенты для пересчета значений, полученных в одной среде (например, воздух), в значения мощности дозы излучения в другой среде (например, Si). Такие коэффициенты пересчета существуют, но чаще всего они энергозависимы. Поэтому когда принимается решение о режиме проведения измерений мощности дозы излучения во время рентгеновского контроля (например, об использовании термомюлюминесцентного дозиметра), результаты полученных измерений нужно перевести в мощность дозы излучения для используемого чувствительного материала (кремния, в случае работы с полупроводниками).

В целом лучше всего проводить предварительные испытания на тестовых платах/компонентах и получать измерения с помощью, например, термомюлюминесцентного дозиметра. Термомюлюминесцентные дозиметры — достаточно полезные устройства, так как они просты в работе и достаточно точно измеряют мощность дозы излучения. Принцип их работы заключается в создании в кристаллической решетке «цветовых центров» во время поглощения ионизированного излучения (в нашем случае рентгеновских лучей). В результате нагрева материала дозиметра высвобождаются фотоны, создаваемые излучением, когда каждый цветовой центр возвращается к нижнему

энергетическому уровню. Эти фотоны можно уловить и посчитать, например, с помощью фотоэлектронного умножителя.

Полученные при инспекции тестового образца результаты (фотоны = доза) затем можно сравнить с калибровочной таблицей для используемого дозиметра. Калибровочная таблица получается в результате облучения термомюлюминесцентного дозиметра с последующим считыванием результатов. Наиболее доступными и пригодными для работы с печатными платами и полупроводниками материалами для дозиметров являются фторид лития (LiF) и борат лития. Дозиметры из фторида лития применимы при мощности дозы излучения до 10 Гр, а дозиметры из бората лития можно использовать для работы с дозами излучения мощностью до 1000 Гр.

### Способы уменьшения мощности дозы излучения

Для уменьшения мощности дозы излучения во время проведения рентгеновского контроля следует продумать каждый из следующих этапов:

- Увеличить расстояние между исследуемым образцом и фокальным пятном рентгеновской трубки. В примере с флип-чипом на демонстрационной плате устройства Bluetooth показано, как изменяется уровень мощности дозы излучения, воздействующего на исследуемый образец, в зависимости от расстояния между исследуемым образцом и фокальной точкой (рис. 4а–л, табл. 2). Возможности увеличения изображения при этом будут ограничены, но не настолько, чтобы пагубно повлиять на проводимый анализ. Тем не менее, уровень мощности дозы излучения будет существенно ниже, а значит, при необходимости инспекцию можно будет проводить дольше.
- Разместить дополнительный фильтр между исследуемым образцом и источником рентгеновского излучения. Предлагается использовать фильтр из цинковой фольги толщиной примерно 100–150 мкм. Это поможет уменьшить дозу излучения в 100 раз или при необходимости увеличить продолжительность инспекции в 100 раз, не жертвуя при этом качеством изображения. Смотрите пример на рис. 4к, л.
- Сократить время проведения инспекции за счет максимальной автоматизации процесса таким образом, чтобы проводилась инспекция только тех участков, которые нужно проверить.
- Продумать необходимость проведения последующих или повторных процедур инспекции (например, после ремонта). Действительно ли необходимо проводить повторный контроль?
- Снять показания с помощью дозиметра, чтобы подтвердить правильность вашего понимания работы системы рентгеновского контроля и подтвердить мощность доз излучения, которые будут воздействовать на исследуемые образцы.

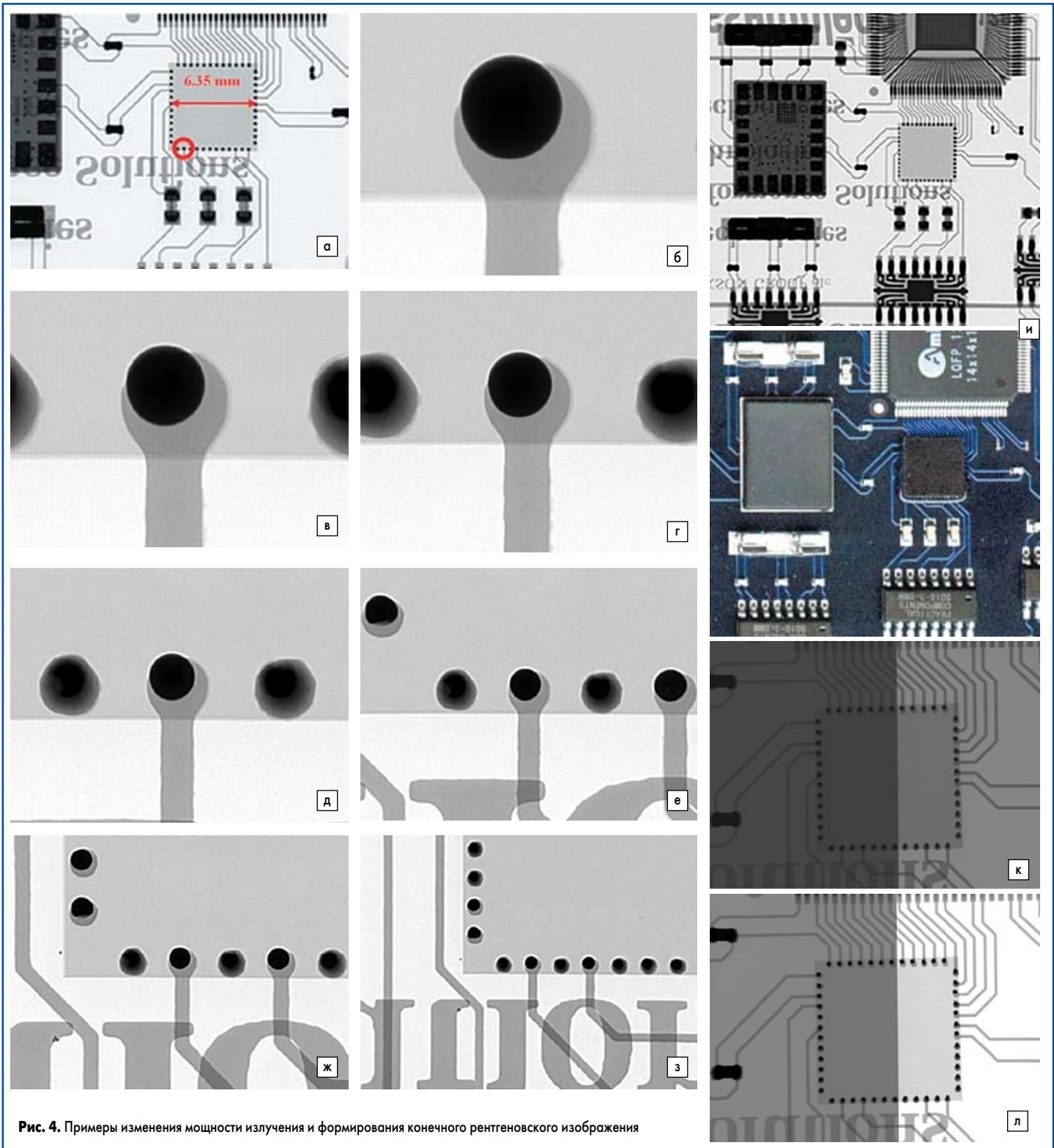


Рис. 4. Примеры изменения мощности излучения и формирования конечного рентгеновского изображения

#### Примеры изменения мощности дозы излучения и формирования конечного рентгеновского изображения

В табл. 2 и на рис. 4 показаны изменения мощности дозы излучения, действующего на исследуемый образец, в зависимости от расстояния между платой и фокальным пятном и влияние изменения расстояния на возможности увеличения и формирования конечного рентгеновского изображения:

- Рис. 4а. Флип-чип на демонстрационной плате Bluetooth. Исследуемый образец находится на расстоянии 145 мм от точки наибольшего увеличения изображения.

Красный кружок показывает увеличенную область на приведенных фотографиях. Исследуемая плата лежит на алюминиевом поддоне толщиной 1 мм (на всех фотографиях рис. 4). Мощность дозы излучения — примерно  $D/5400$  Гр/мин.

- Рис. 4б. Исследуемый образец находится в положении наибольшего увеличения изображения и поэтому подвергается наибольшей мощности дозы излучения ( $D$  Гр/мин). Диаметр шарикового вывода — примерно 190 мкм.
- Рис. 4в. Исследуемый образец находится на расстоянии 1,1 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $0,4 D$  Гр/мин.

- Рис. 4г. Исследуемый образец находится на расстоянии 2,4 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $D/5$  Гр/мин.
- Рис. 4д. Исследуемый образец находится на расстоянии 4,9 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $D/12$  Гр/мин.
- Рис. 4е. Исследуемый образец находится на расстоянии 9,1 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $D/31$  Гр/мин.
- Рис. 4ж. Исследуемый образец находится на расстоянии 15,5 мм от точки наибольшего увеличения изображения.

Мощность дозы излучения — примерно  $D/77$  Гр/мин.

- Рис. 4з. Исследуемый образец находится на расстоянии 29,4 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $D/247$  Гр/мин.
- Рис. 4и. Исследуемый образец находится на расстоянии 273 мм от точки наибольшего увеличения изображения. Мощность дозы излучения — примерно  $D/18\,906$  Гр/мин. Фотография на рис. 4и (снизу) получена с помощью системы АОИ. Эта фотография наглядно демонстрирует, что с помощью системы рентгеновского контроля можно увидеть то, что скрыто от глаз.
- Рис. 4к. Изображение флип-чипа, левая половина которого закрыта цинковой фольгой толщиной в 100 мкм.
- Рис. 4л. Фотография после настройки контрастности с помощью программного обеспечения системы рентгеновского контроля. Фотография наглядно демонстрирует, что та часть изображения, на которую наложен фильтр, может быть использована для проведения инспекции.

Например, если использовать рис. 4д для инспекции вместо рис. 4б, то нужная для анализа информация практически вся сохраняется, между тем как мощность дозы излучения уменьшается до чуть меньше чем 90% (если сравнивать с рис. 4б). Если посмотреть на эту ситуацию с другой стороны, то оператор мог бы провести в 12 раз больше времени, проверяя исследуемый образец в положении получения рис. 4д, если сравнивать с положением получения рис. 4б.

В этом примере печатная плата лежала на алюминиевой пластине толщиной 1 мм. Для инспекции использовалась рентгеновская трубка открытого типа, работающая на про-свет, причем толщина бериллиевого окна составляла 0,5 мм. Максимальное увеличение получено на расстоянии 2 мм, так как толщи-

**Таблица 2.** Зависимость мощности дозы излучения и времени накопления дозы от расстояния между исследуемым объектом и фокальным пятном

Расстояние от исследуемого объекта до фокального пятна, мм	Мощность дозы излучения, Гр/мин**	Рисунок	Время накопления дозы D, мин
2*	$D^{***}$	Рис. 4б	1
3,1	$0,416 D$	Рис. 4в	2,4
4,4	$0,207 D$	Рис. 4г	4,8
6,9	$8,4 \times 10^{-2} D$	Рис. 4д	11,9
11,1	$3,3 \times 10^{-2} D$	Рис. 4е	30,3
17,5	$1,3 \times 10^{-2} D$	Рис. 4ж	76,9
31,4	$4,06 \times 10^{-3} D$	Рис. 4з	246
147	$1,85 \times 10^{-4} D$	Рис. 4а	5400
275	$5,3 \times 10^{-5} D$	Рис. 4и	18 868

**Примечание.**

\* — Положение с максимальным увеличением изображения исследуемого образца.

\*\* —  $1 \text{ Гр/мин} = 100 \text{ рад/мин}$ .

\*\*\* — Значение D — это кВ, зависит от мощности трубки рентгеновского излучения и системы рентгеновского контроля. В значениях D игнорируется эффект фильтрации рентгеновских лучей через другие участки платы/объекта.

на печатной платы (0,5 мм) также включена в общее расстояние между платой и трубкой. Надписи, показанные на рис. 4а, е-з, к, л, нанесены с обратной стороны печатной платы.

### Заключение

Мощность доз излучения, воздействующих на электронные устройства во время проведения рентгеновского контроля, могут быть выше ожидаемых из-за необходимости получения изображений большего увеличения. Это приводит к тому, что исследуемый объект (обычно это кремниевый кристалл) нужно ближе подносить к источнику излучения, где

на него воздействуют дозы излучения большей мощности. Поэтому может понадобиться проверить, не будет ли воздействовать случайное излучение на чувствительные элементы при планируемых значениях мощности дозы излучения. В этом случае нужно будет высчитать и по возможности подтвердить с помощью измерений мощность дозы излучения во время проведения инспекции. Если мощность дозы излучения предположительно может вызывать опасения, то необходимо предпринять некоторые действия, чтобы уменьшить ее. Эти действия можно предпринимать по одному или в комбинации друг с другом:

- По возможности избегать проведения повторной инспекции, так как излучение имеет тенденцию накапливаться.
- Намеренно располагать исследуемый образец как можно дальше от фокального пятна. Это уменьшит возможности увеличения изображения, но и существенно уменьшит мощность дозы излучения во время проведения контроля.
- Добавить фильтр из цинковой фольги толщиной примерно 100–150 мкм.

### Литература

1. Clifford T. Electronic Packaging and Production, 02/01/2002.
2. Blish R. IEEE International Reliability Physics Symposium. Dallas, TX, Apr 2002.
3. Blish R. et al. IEEE Trans. Devices & Materials Reliability. 2002. Vol. 2, № 4.
4. [http://nppp.jpl.nasa.gov/docs/Radcrs\\_Final5.pdf](http://nppp.jpl.nasa.gov/docs/Radcrs_Final5.pdf)
5. Dressendorfer P. V. Basic Mechanisms for the New Millennium // IEEE Press, NSREC Short Course, 1998.
6. [http://www.usps.com/news/2001/press/pr01\\_093.htm](http://www.usps.com/news/2001/press/pr01_093.htm)
7. Bernard D. The Proceedings of SMTA International Conference. Sept 2002.