

ТЕХПОДДЕРЖКА

Воздействие рентгеновского излучения на электронные устройства и компоненты



Текст: **Игорь Проказов**



Метод рентгеновского контроля печатных узлов и электронных компонентов широко применяется на предприятиях радиоэлектронной промышленности. Однако вопрос о том, может ли данный метод нанести ущерб полупроводниковым компонентам, до сих пор остается открытым. В статье мы постараемся ответить на него, а также дать практические рекомендации по использованию рентген-контроля в контексте исследования полупроводниковых изделий.

Геометрическое увеличение (M), т.е. отношение размера изображения (B) к размеру объекта (G), определяется по формуле:

$$M = \frac{B}{G} = \frac{FDD}{FOD}$$

где **FDD** — расстояние от источника излучения до детектора, **FOD** — расстояние от источника излучения до объекта

Теоретические основы

ЧТО МЫ ВИДИМ НА РЕНТГЕНОВСКОМ СНИМКЕ?

Система рентген-контроля представляет собой источник рентгеновского излучения, манипулятор и детектор, объединенные в одном устройстве **рис 1**.

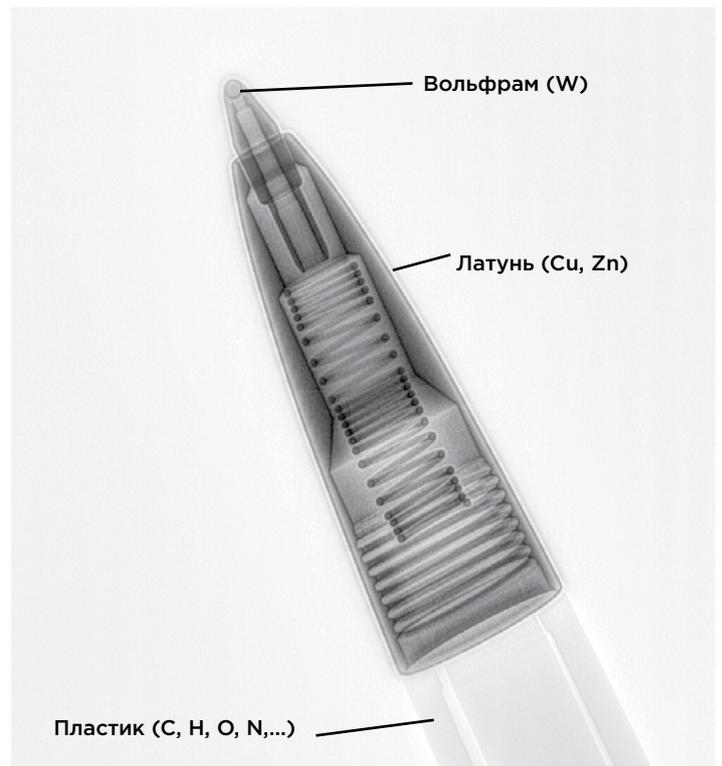
Источник (рентгеновская трубка) генерирует рентгеновские лучи, проникающие сквозь исследуемый образец; приемник (детектор излучения) регистрирует теньевую проекцию данного образца. Исследуемый образец будет по-разному поглощать (ослаблять интенсивность) рентгеновские лучи в зависимости от плотности, толщины, а также атомного номера материала образца.

Проекции, зарегистрированные детектором, показывают различное ослабление интенсивности рентгеновских лучей при прохождении различных участков образца. Например, на рентгеновском снимке авторучки мы одновременно видим пластиковый корпус, металлическую пружину и стержень **рис 2**.

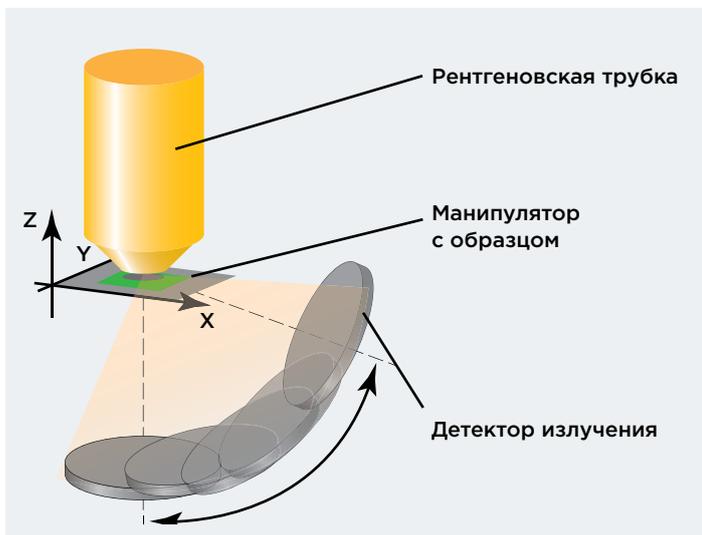
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ

От чего зависит геометрическое увеличение?

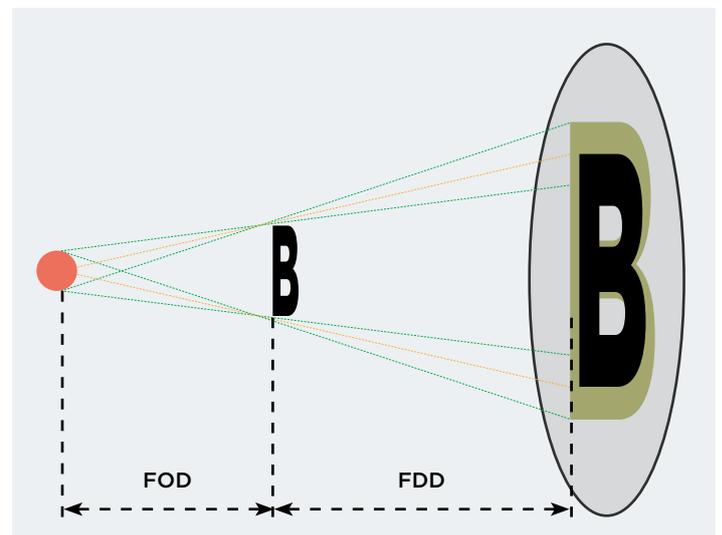
Чем ближе образец к источнику излучения, тем большую тень он отбрасывает, и, соответственно, тем большее увеличение мы получим на снимке **рис 3**.



2 Рентгеновский снимок авторучки



1 Принципиальная схема рентгеновской установки



3 Геометрическое увеличение рентгеновской микроскопии

ЧТО ТАКОЕ СПЕКТР?

Рентгеновское излучение образуется в результате взаимодействия электронного пучка с атомами мишени **рис 4**

Спектр излучения рентгеновской трубки **рис 5** представляет собой наложение тормозного и характеристического спектров. При этом тормозной спектр — сплошной, т.к. электроны, бомбардирующие мишень, могут потерять часть своей энергии. Характеристическое излучение испускается атомами мишени при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой.

ЧТО ТАКОЕ ДОЗА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ?

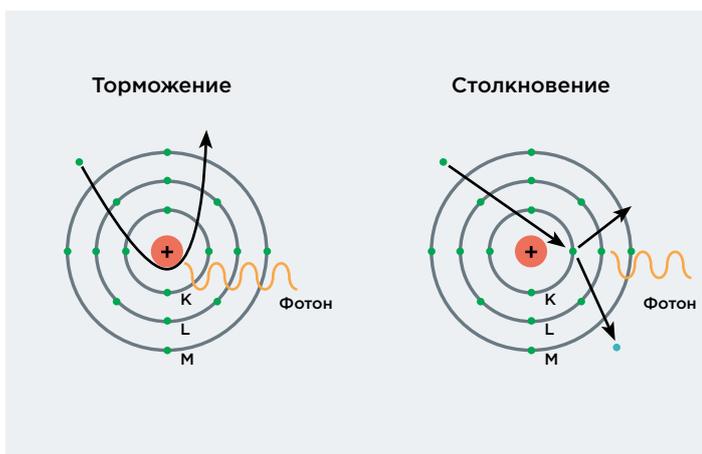
Основной величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения, определяемая как отношение средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме.

В качестве единицы поглощенной дозы излучения в СИ принят Грей (Гр) — в честь английского ученого Л. Грея (L. H. Gray), известного своими трудами в области радиационной дозиметрии: 1 Грей = 1 Дж/кг = 100 рад. Поглощенная доза зависит от вида, интенсивности излучения, его энергетического и качественного состава, времени облучения, а также от состава вещества. Доза ионизирующего излучения тем больше, чем длительнее время излучения.

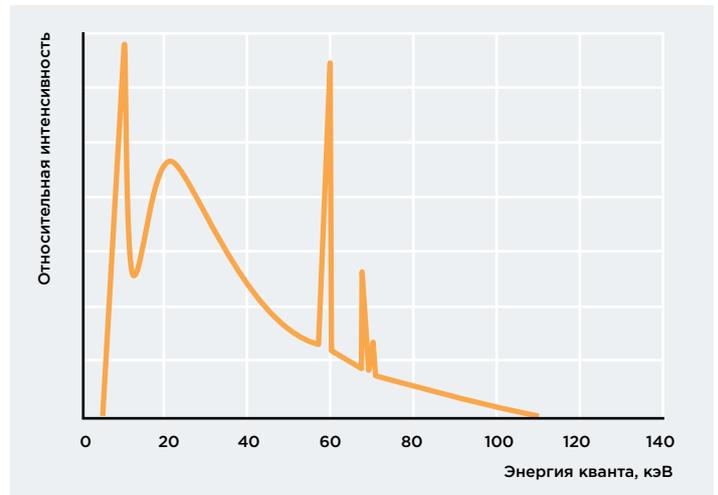
Для обозначения дозы, которую получит образец за время инспекции, используют термин «мощность дозы излучения» [Гр/с].

КАКОЙ ДИАПАЗОН ЭНЕРГИЙ ИЗ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОГЛОЩАЕТ КРЕМНИЙ?

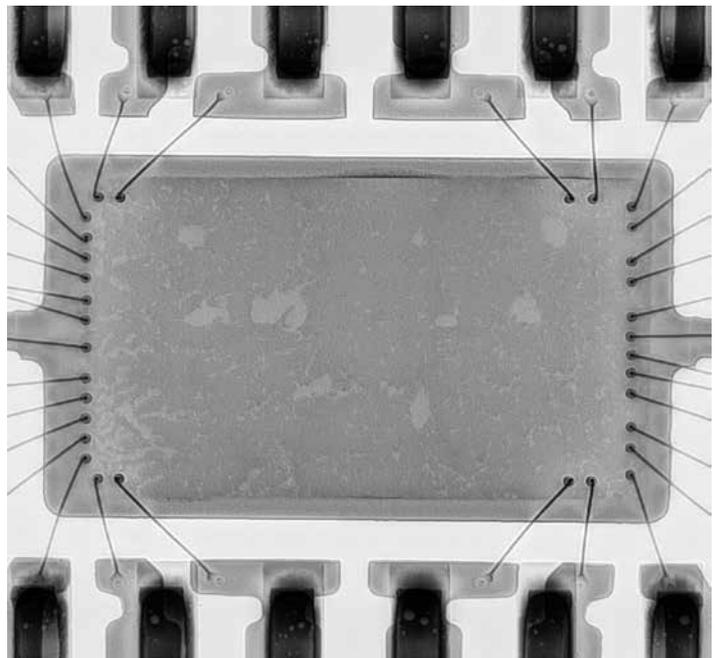
Рассмотрим снимок микросхемы в корпусе **рис 6**. Кристалл из кремния на снимке практически не виден. Так есть ли в нем какое-либо поглощение? В данном случае поглощение Si / SiO₂ приходится, в основном, на неиспользуемый спектральный интервал, т.е. область с низкой чувствительностью детектора **рис 7**.



4 Виды взаимодействия электронного пучка с атомами мишени



5 Спектр рентгеновского излучения, испускаемого вольфрамовой мишенью при напряжении на источнике (трубке) 130 кВ



6 Снимок микросхемы в корпусе



7 Чувствительность детектора излучений

Механизм повреждения

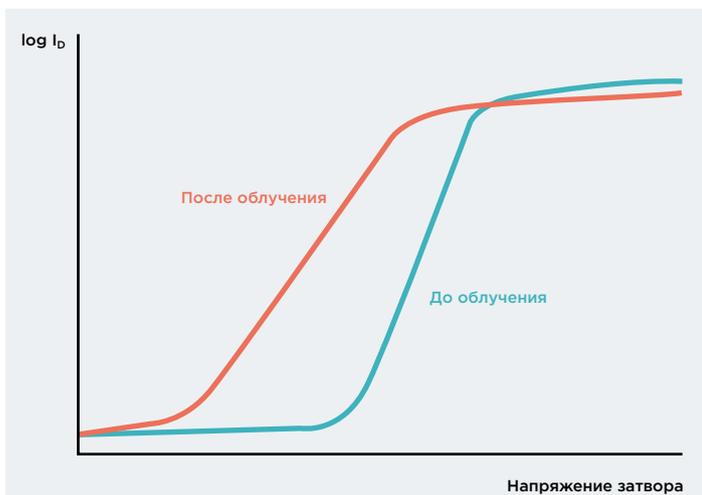
ЧТО ЖЕ ПРОИСХОДИТ С МИКРОСХЕМОЙ, КОГДА ОНА ПОДВЕРГАЕТСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ?

Механизмы повреждений различаются от технологии к технологии, например, для современных микросхем важны радиационно-индуцированные токи утечки, а в старых технологиях важную роль играл сдвиг порогового напряжения транзистора.

К примеру, при прохождении рентгеновского излучения через транзистор в подзатворном диэлектрике начинает накапливаться заряд, который будет влиять на работу транзистора как дополнительно приложенное

напряжение (или как сдвиг порогового напряжения). В результате транзистор будет постоянно «открыт», что естественно приведет к потере работоспособности схемы. Также уменьшение порогового напряжения транзистора приведет к превышению общего тока потребления микросхемы из-за токов утечки.

На рис 8 приведена вольтамперная характеристика МОП n-канального транзистора до и после облучения.



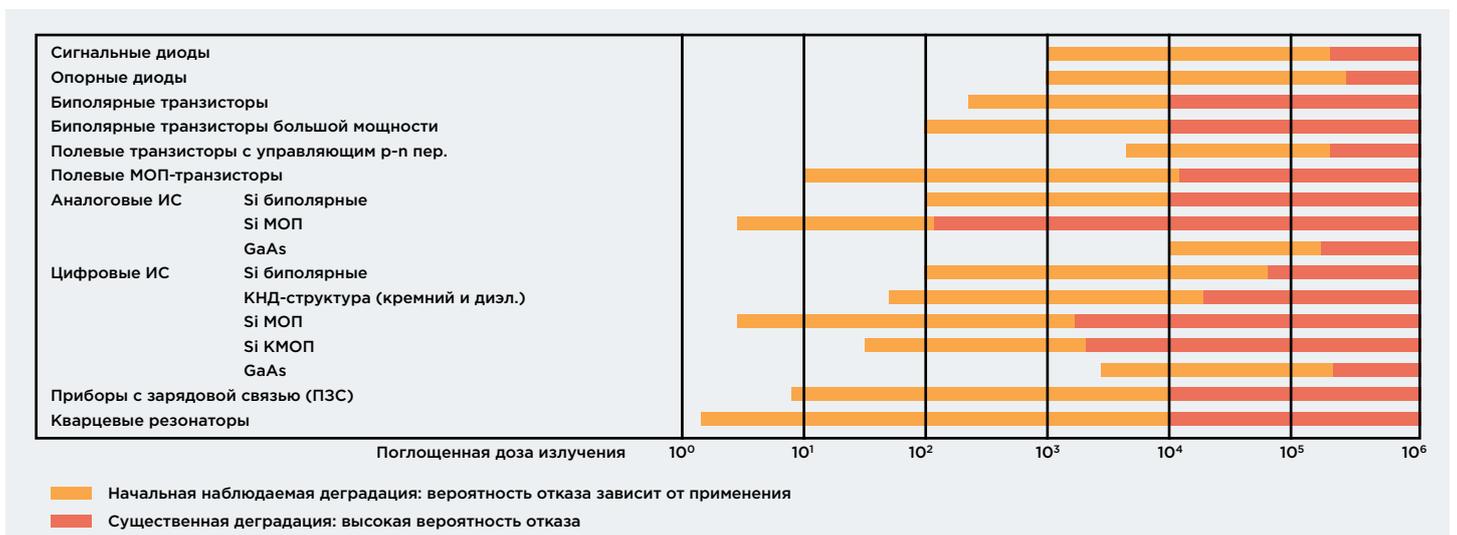
8 Вольтамперная характеристика МОП n-канального транзистора до и после облучения

Зависимость от поглощённой дозы рентгеновского излучения

Дрейф отдельных характеристик микросхемы и, следовательно, возможный отказ обусловлены полной поглощенной дозой. Микросхема, используемая в бытовой технике, после накопления 50-100 Гр может перестать работать (а критическая доза рентгеновского излучения для человека составляет 5-10 Гр). Максимально допустимые дозы приблизительно известны и представлены в различных источниках¹ рис 9.

Отдельно следует рассмотреть радиационно-стойкие микросхемы. На сегодняшний день существует целый класс подобных микросхем, например, микросхемы западного производства, относящиеся к категории «Space» и выпускаемые для космической промышленности. Такие микросхемы, выпускаемые в металлокерамических корпусах, являются радиационно-стойкими.

Следует отметить, что микросхемы отечественного производства (согласно перечню МОП 44.001), прошедшие приемку № 3 и № 5, не обязательно являются радиационно-стойкими. Стойкость к спецфакторам, как правило, указывается в документации на микросхему.



9 Максимально допустимые дозы излучения

1 «Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits»// T.P. Ma und P. V. Dressendorfer// John Wiley & Sons, New York 1989

В общем виде зависимость поглощенной дозы от параметров съемки на рентгеновской установке рассчитывается по формуле:

$$\text{Мощность дозы} = A \cdot \frac{I \cdot U^2}{FOD^2} \left[\frac{\text{Гр}}{\text{с}} \right]$$

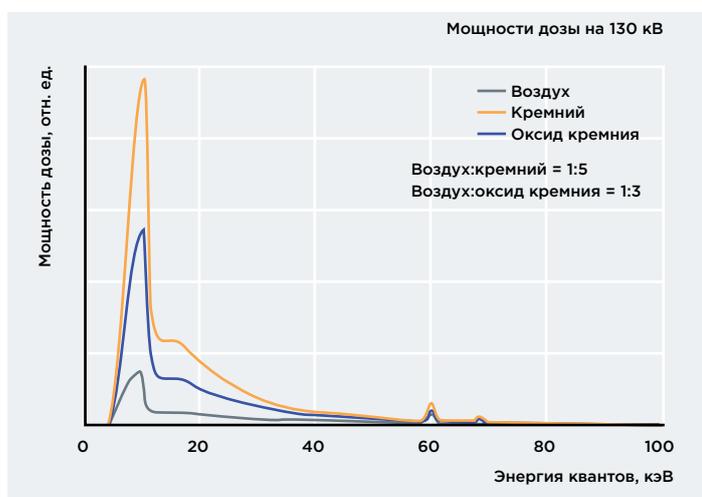
Где I — ток нити накала, U — ускоряющее напряжение, FOD — расстояние от объекта исследования до источника рентгеновского излучения, A — некий параметр, зависящий, в частности, от КПД рентгеновской трубки, используемых фильтров излучения и материала образца

Рассмотрим основные факторы, от которых зависит мощность поглощенной дозы.

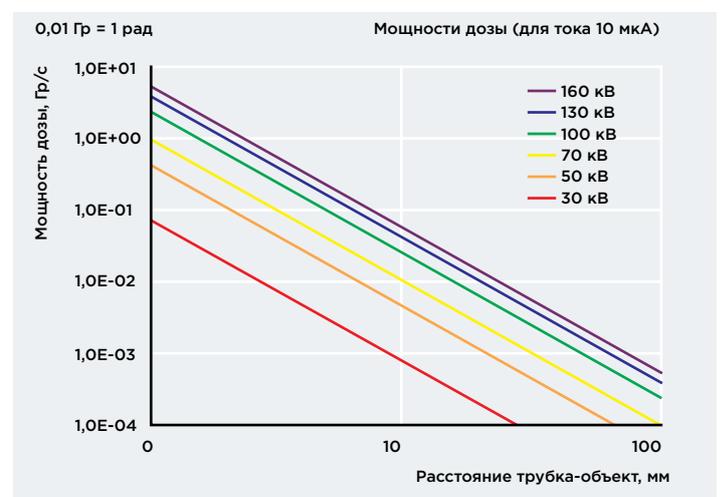
- Зависимость от расстояния: источник излучения — объект. Мощность дозы обратно пропорциональна квадрату расстояния (т.е. увеличение FOD в 2 раза уменьшает дозу в 4 раза). Чтобы уменьшить мощность дозы излучения до допустимого предела, не следует без необходимости приближать исследуемый образец вплотную к источнику излучения.
- Мощность дозы рентгеновского излучения. Зависит от параметров рентгеновской трубки: ускоряющего (анодного) напряжения и тока нити накала. При этом существует квадратичная зависимость от напряжения и линейная зависимость от тока.
- Различные материалы накапливают дозу по-разному. Например, излучение, поглощённое кремнием, выше поглощённого воздухом в 5 раз.

При ускоряющем напряжении 130 кВ и токе 30 мкА и расстоянии трубка-детектор 10 мм (типичные параметры инспекции микросхем) опасная доза для большинства гражданских микросхем (50 — 100 Грей) будет получена примерно за 500 секунд, т.е. менее чем за 10 минут рис 10.

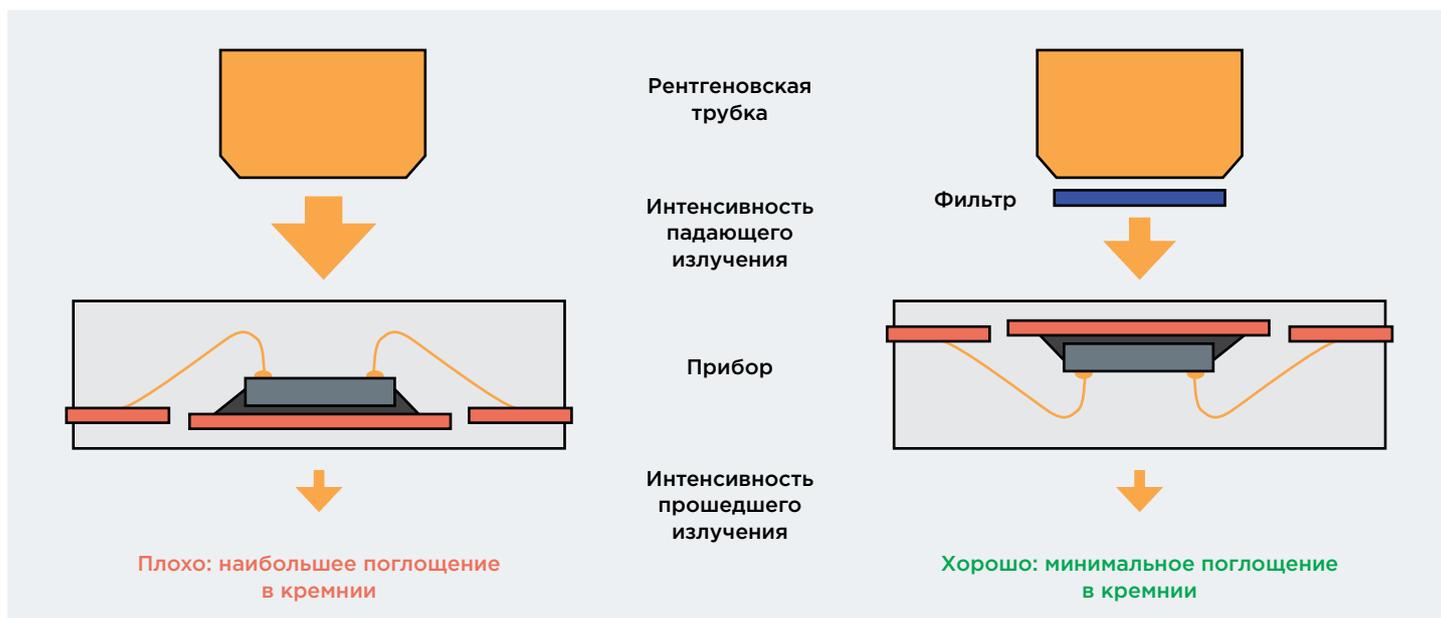
Оценить поглощенную дозу излучения и, следовательно, вероятность отказа из-за деградации, вызванной воздействием рентгеновского излучения, можно следующим образом. По графику, приведенному на рис 11, можно оценить мощность поглощенной дозы в зависимости от расстояния источника излучения-объекта. Умножив эту мощность на время воздействия излучения на объект, получим поглощенную дозу. Подобные графики можно построить при помощи специализированного программного обеспечения, пример которого есть в открытом доступе².



10 Поглощение дозы различными материалами



11 Зависимость мощности дозы от расстояния трубка-объект при различных значениях ускоряющего напряжения



12 Фильтрация рентгеновского излучения

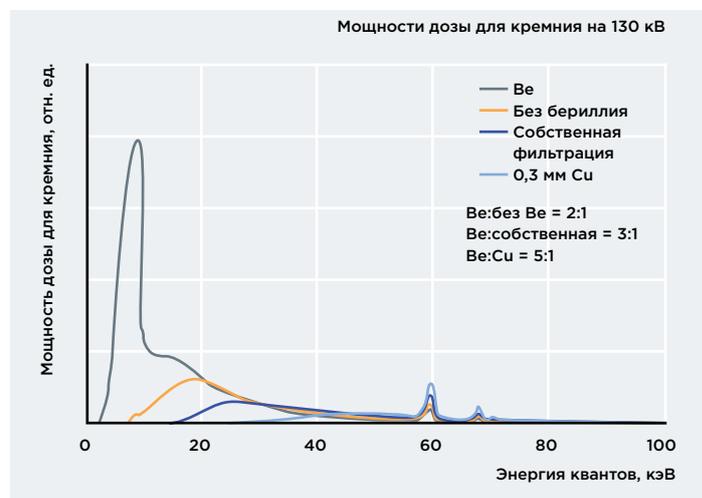
Как снизить дозу рентгеновского излучения

Далее рассмотрим ряд возможностей, позволяющих существенно уменьшить вероятность получения критической дозы при контроле образцов, чувствительных к ионизирующему излучению.

СПОСОБ №1

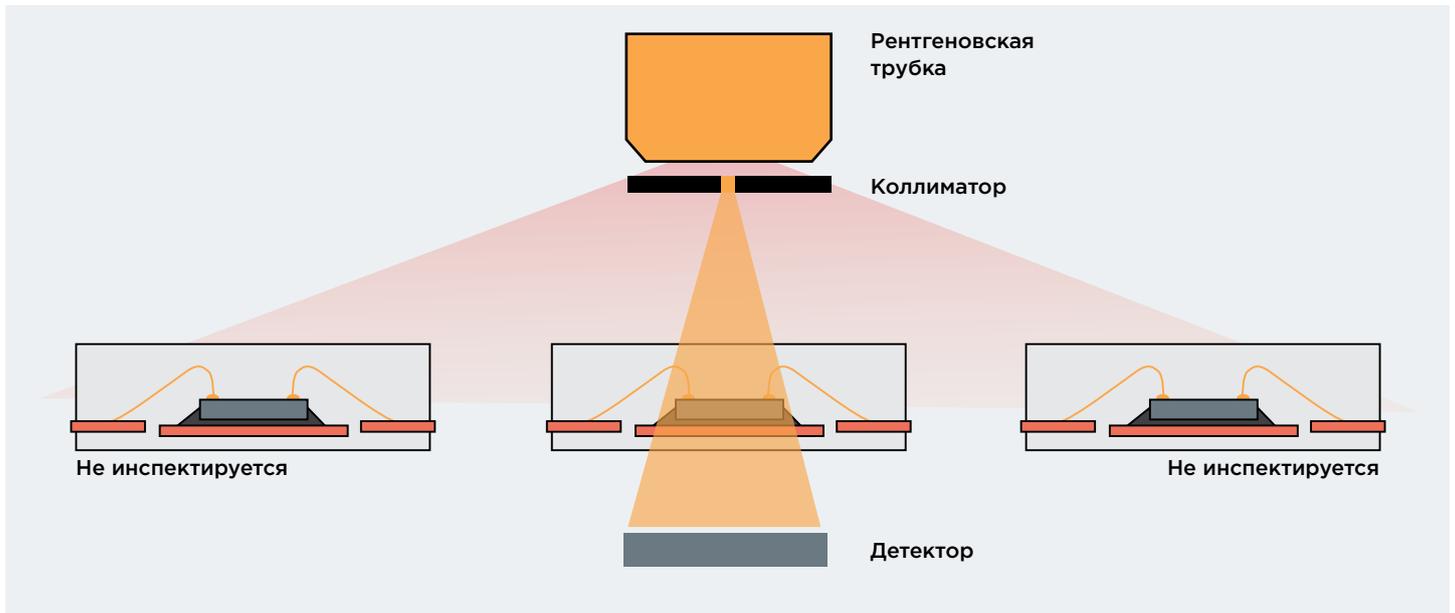
Прежде всего, это фильтрация излучения трубки. При прохождении рентгеновских лучей через материал спектр излучения меняется, что можно использовать для поглощения опасной для полупроводников части спектра, бесполезной с точки зрения регистрации на детекторе. Фильтрацию можно разделить на собственную и внешнюю. Собственная фильтрация — в качестве фильтра используется корпус изделия, печатная плата рис 12. Объект исследования располагается таким образом, что печатная плата или корпус находятся между рентгеновским излучением от трубки и полупроводниковой микросхемой. Внешние фильтры устанавливаются непосредственно на источник излучения.

Некоторые источники^{3 4} указывают, что для существенного уменьшения дозы следует использовать фильтры с атомным числом в диапазоне 30-35, например 0,3-0,4 мм цинка. На практике подобные фильтры существенно уменьшают интенсивность рентгеновских лучей, в результате чего получается изображение с низ-



13 Изменение мощности дозы в зависимости от материала фильтра/мишени

3 Blish R. IEEE International Reliability Physics Symposium. Dallas, TX, Apr 2002
 4 Blish R. et al. IEEE Trans. Devices & Materials Reliability. 2002. Vol. 2, № 4



14

Результат применения коллиматора

кой контрастностью. Поэтому предпочтительно использовать медь, хотя ее атомный номер несколько ниже ($Z=29$) — подобный фильтр позволяет уменьшить дозу, воздействующую на исследуемый компонент, до пяти раз без потери контраста изображения рис. 13.

Фильтры, устанавливаемые на трубке в сочетании с собственной фильтрацией, позволяют получить достаточную интенсивность на детекторе при минимальной дозе, поглощенной в кремнии.

СПОСОБ №2

Еще одна возможность снизить дозу — использовать коллиматор и/или диафрагму источника излучения. Обрезание неиспользуемого облучения за счет кол-

лиматора или диафрагмы позволяет сократить угол распространения рентгеновского излучения. В результате облучается только та область исследуемого образца, которая находится в поле зрения детектора рис. 14.

СПОСОБ №3

И, наконец, программирование инспекции. Данная опция присутствует практически во всех современных системах рентгеновской инспекции и помогает не только сократить время инспекции, но и значительно снизить общее время облучения образца.

Все вышеперечисленные методы позволяют уменьшить дозу от 10 до 100 раз.

Радиационный метод контроля (рентген-контроль) паяных соединений является одним из популярных способов проверки качества пайки электронных компонентов. В статье мы рассмотрели вопрос влияния рентгеновской инспекции на работоспособность полупроводниковых компонентов. На основе проведенного исследования были выработаны рекомендации по оптимизации процесса рентгеновского контроля для сведения потенциального радиационного ущерба к минимуму. ▽