

Высокое качество изображения. Последнее поколение детекторов рентгеновского излучения «SID-A50»

Практически все микрофокусные системы рентгеновского излучения, представленные на рынке, оборудованы электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) — детекторами первого поколения или КМОП — детекторами второго поколения. Эти детекторы имеют ограничения по производительности, что вызывает проблемы при эксплуатации. Эта статья представляет третье поколение рентгеновских детекторов — камеры прямого преобразования, которые исправляют данные недостатки.

Александр Литвинов

Электронно-оптический преобразователь

Первый детектор рентгеновского излучения, который был приспособлен к микрофокусным рентгеновским системам контроля, — это электронно-оптический преобразователь (рис. 1). ЭОП содержит фотоэлектронный умножитель, который усиливает поток электронов, при этом достигается высокая чувствительность к рентгеновскому излучению. Однако для преобразования рентгеновского излучения в доступное для оператора изображение на мониторе оно должно пройти несколько стадий (рис. 1). На каждом из 5 преобразований исходная информация искажается, что в конечном итоге приводит к значительным потерям информации и низкому качеству визуального изображения.

Рассмотрим основные недостатки ЭОП подробнее.

Размытие и эффект «выжигания» сцинтилляторов

Сцинтилляторы используются как среда преобразования рентгеновского излучения. При поглощении рентгеновского излучения сцинтиллятор излучает свет приблизительно пропорционально поглощенной энергии. Однако даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда выходного сигнала меняется от события к событию. В результате свет внутри сцинтиллятора рассеивается, искажая информацию об объекте. При преобразовании рассеянного света в поток электронов посредством фотоэлектрической поверхностной пленки изображение становится размытым.

Кроме того, рентгеновское излучение, поглощенное сцинтиллятором, повреждает его (эффект «выжигания»). Это приводит к постоянной деградации чувствительности.

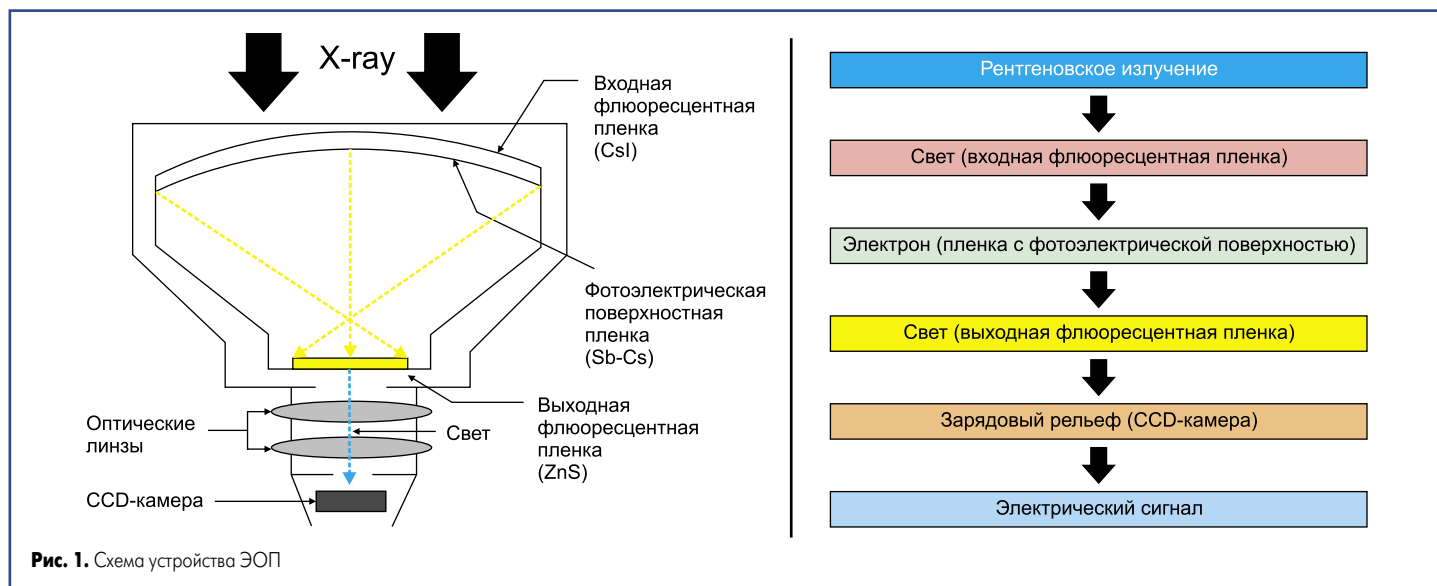


Рис. 1. Схема устройства ЭОП

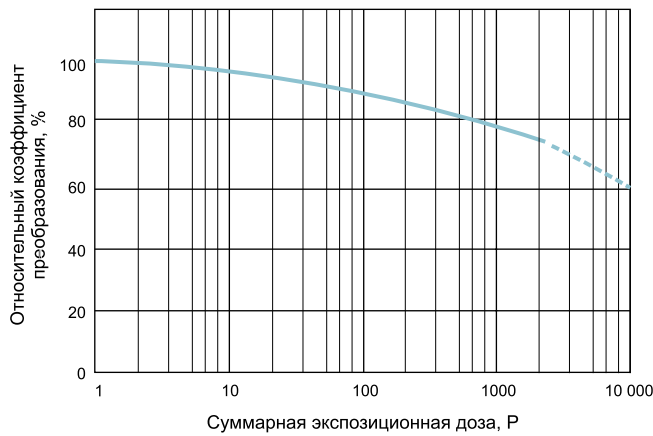


Рис. 2. График временной деградации ЭОП

Временная деградация

На рис. 2 показано отношение суммарной экспозиционной дозы (cumulative incident dose) к относительному коэффициенту преобразования. Как видно на рисунке, коэффициент преобразования рентгеновского излучения в ЭОП сильно деградирует со временем. При достижении суммарной поглощенной дозы 10 000 Р деградация яркости составляет 40% [1].

Кроме того, электронно-оптические преобразователи нуждаются в регулярной калибровке уровня усиления, чтобы компенсировать временную деградацию чувствительности (динамического диапазона) камеры и иметь возможность давать картинку при более или менее похожих условиях. Уровень черного камеры будет постоянно расти, и понадобится регулярная калибровка изображения с помощью программного обеспечения. При калибровке необходимо будет сокращать уровень черного и искусственно завышать уровень сигнала, в результате чего количество и качество информации сократится. В новом электронно-оптическом преобразователе чувствительность детектора снижается примерно на 40% в течение полугода после установки.

Дисторсия изображения

На рис. 3 приведено типичное изображение, полученное с помощью преобразования рентгеновского излучения посредством ЭОП. Из-за сферической входной поверхности в выходном изображении возникает неравномерность яркости по полю, когда центр изобра-

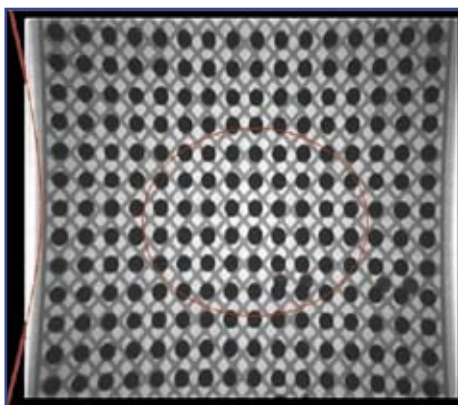


Рис. 3. Типичное изображение с ЭОП

жения ярче, а периферия темнее. К тому же изображение имеет подушкообразное дисторсионное искажение, которое усиливается по мере удаления от центра.

Динамический диапазон

В ЭОП изображение с выходной флуоресцентной пленки через оптическую систему попадает на ПЗС-детектор. Конечное качество изображения сильно зависит от возможностей ПЗС-детектора. Он не может в полной мере передать аналоговые характеристики ЭОП. Как результат для детектора в целом широкий динамический диапазон ЭОП остается на уровне динамического диапазона ПЗС.

Проблемы эксплуатации

Проблема дисторсионного искажения вызывает серьезные затруднения при эксплуатации. Например, для инспекции проводных соединений внутри микросхем в корпусе QFP (Quad Flat Package) используется микрофокусная рентгеновская установка. В изображении, полученном при помощи ЭОП, из-за дисторсии проводные соединения кажутся искаженными, что мешает правильной интерпретации состояния проводов оператором (рис. 4).

Детектор КМОП

Для того чтобы решить перечисленные выше проблемы ЭОП, было разработано второе поколение детекторов рентгеновского излучения — КМОП-детекторы. Они намного

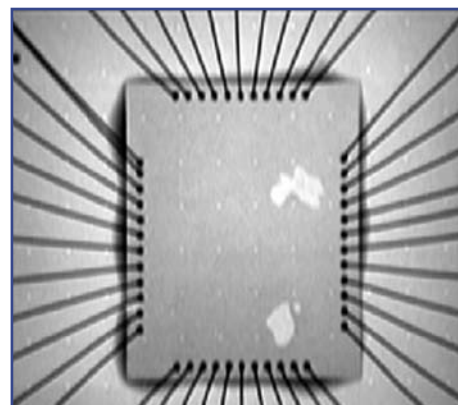


Рис. 4. Проводные соединения внутри QFP

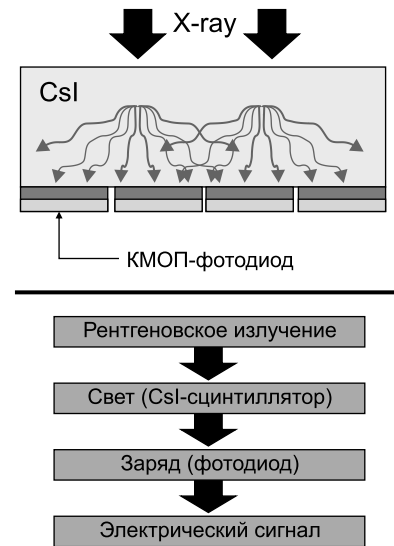


Рис. 5. Схема устройства КМОП-детектора

эффективнее своих предшественников: для получения электрического сигнала необходимо 3 преобразования исходного сигнала. Принцип работы КМОП-детектора схематично показан на рис. 5.

Однако и второе поколение детекторов обладает серьезными недостатками.

Нечеткость изображения и эффект «выжигания»

Как и в случае с электронно-оптическим преобразователем, использование сцинтиллятора вызывает рассеяние света, а эффект «выжигания» сцинтиллятора вызывает деградацию чувствительности.

Деградация с течением времени

Рентгеновское излучение обладает высокой проникающей способностью, поэтому только незначительное количество рентгеновских лучей преобразовывается в свет. Большая же их часть проходит сквозь сцинтиллятор и «бомбардирует» электрическую схему КМОП. Это не может не сказаться на конечном изображении: со временем уровень черного растет и изображение становится темнее. А значит, необходимо будет регулярно проводить программную калибровку изображения.

Компоненты КМОП-детектора уязвимы по отношению к мощному электромагнитному воздействию рентгеновского излучения. Повреждения компонентов КМОП накапливаются с течением времени, что приводит к ухудшению характеристик детектора и его полному выходу из строя.

Чувствительность

Несмотря на более широкий в сравнении с ПЗС динамический диапазон, КМОП-детекторы имеют низкую чувствительность. Более того, реакция на мягкое рентгеновское излучение (на низких уровнях напряжения генератора) очень низкая. Следовательно, для того чтобы исправить это положение, необходимо использовать излучение высокой мощности, которое только усиливает процесс деградации детектора.

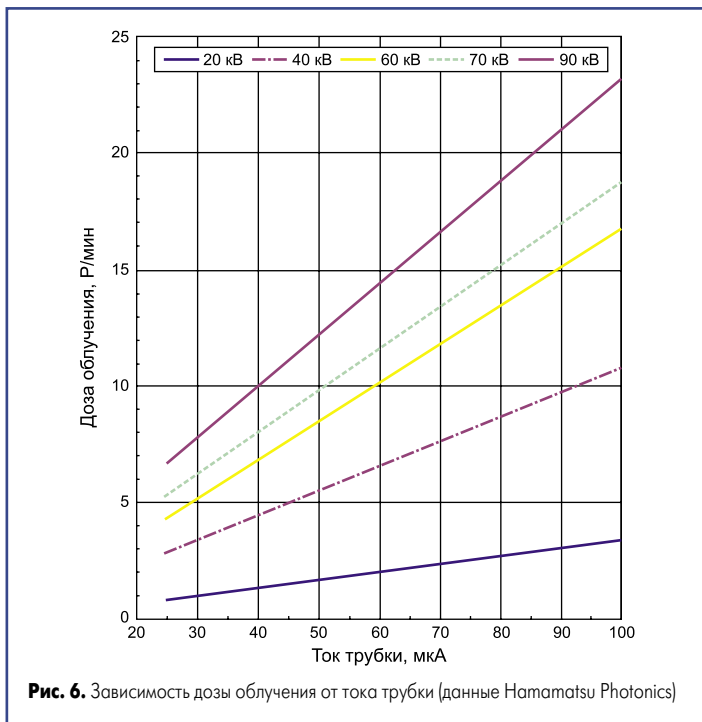


Рис. 6. Зависимость дозы облучения от тока трубки (данные Hamamatsu Photonics)

Время захвата изображения

Как правило, частота кадров при обработке каждого пикселя (режим 1×1) — 4 кадра/с. Этого недостаточно, учитывая, что стандарт видеоизображения — 25 кадров/с. Для ускорения процесса обработки изображения используют режимы 2×2 , 4×4 и т. д., когда ячейка из четырех пикселей (2×2) или из 16 пикселей (4×4) обрабатывается как 1 пиксель с интерполированным сигналом. «Жертвой» скорости обработки становится качество изображения, которое теряется в процессе интерполяции соседних пикселей ячейки обработки.

Проблемы эксплуатации

Один из основных недостатков КМОП — малое время эксплуатации, вызванное прежде всего чувствительностью к негативному воздействию рентгеновского излучения. Временная деградация вызывает серьезные проблемы в эксплуатации КМОП-детекторов. Для того чтобы оценить срок эксплуатации типичного детектора, проведем несложные расчеты.

Радиационная стойкость КМОП-детектора составляет приблизительно 1 000 000 Р. При напряжении рентгеновской трубки 90 кВ, токе 100 мкА и расстоянии от генератора до детектора в 300 мм доза облучения КМОП-детектора — 23 Р/мин. (рис. 6). $23 \text{ Р/мин.} = 1380 \text{ Р/ч} = 11\,040 \text{ Р/день}$ (при работе 8 часов в день).

$$\text{Время эксплуатации КМОП-детектора} = \frac{\text{Радиационная стойкость}}{\text{Доза облучения}} = \frac{1\,000\,000}{11\,040} \approx 90 \text{ дней.}$$

Таким образом, время эксплуатации КМОП-детекторов при интенсивном использовании действительно очень мало. А замена вышедших из строя КМОП-детекторов в системах микрофокусной инспекции — дорогая операция, значительно увеличивающая стоимость обслуживания системы.

Детектор рентгеновского излучения третьего поколения SID-A50

Компании Pony Industry и Hamamatsu Photonics, одни из первых разработчиков КМОП-детекторов для микрофокусной рентгеновской инспекции, первыми столкнулись с проблемами, описанными выше. Для разработки нового поколения детекторов потребовались глубокие научные исследования, в результате которых появилась камера третьего поколения SID-A50. Внешний вид камеры приведен на рис. 7.

В отличие от других детекторов (непрямого преобразования) у SID-A50 нет сцинтиллятора, следовательно, отсутствует промежуточное преобразование рентгеновского излучения в свет. Как показано на рис. 8,

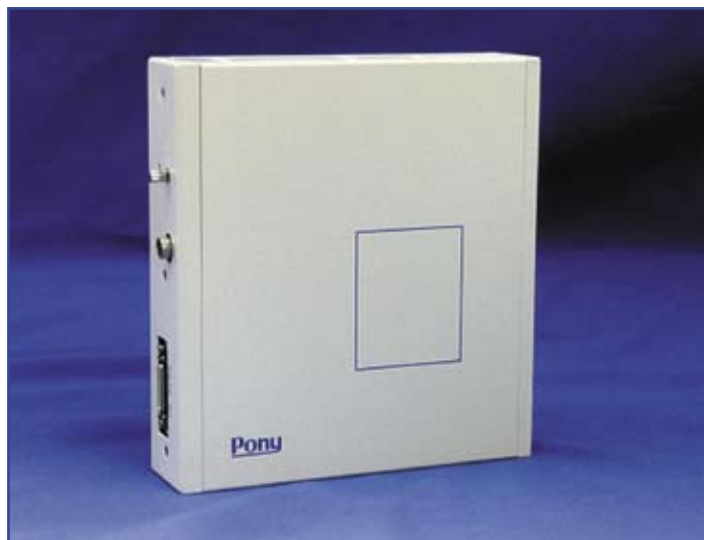


Рис. 7. Внешний вид камеры SID-A50

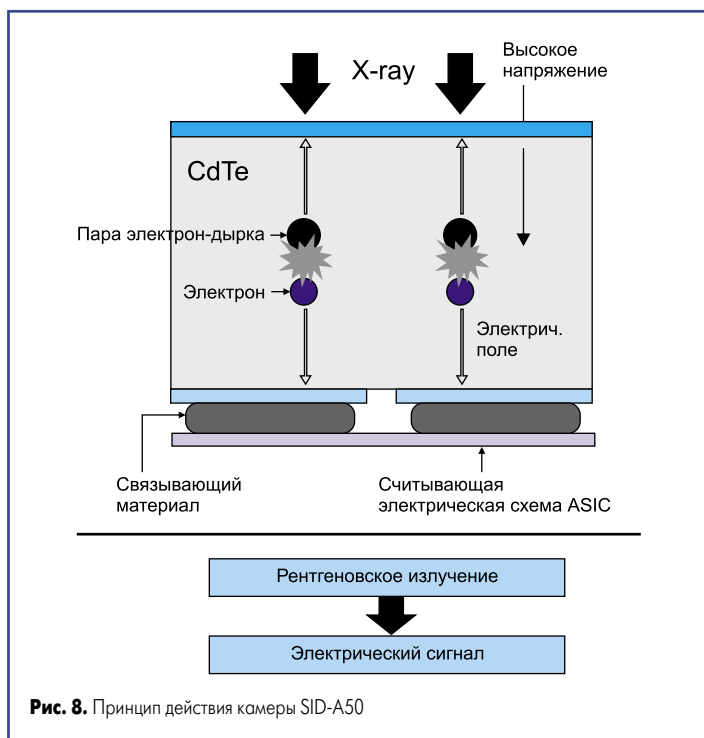


Рис. 8. Принцип действия камеры SID-A50

камера прямого преобразования SID-A50 оборудована полупроводниковым компаундом из теллурида кадмия (CdTe) в качестве приемной поверхности. Этот полупроводниковый материал генерирует электрический сигнал в соответствии с поступающей на него дозой излучения. Он обладает уникальными характеристиками, что позволяет устранить проблемы, возникающие при использовании других детекторов.

Четкость изображения

При устранении звена сцинтиллятора из цепочки преобразования рентгеновского излучения изображение становится кристально чистым, а эффективность преобразования исключительной (рис. 9). В сравнении со своими предшественниками — детекторами непрямого преобразования — SID-A50 демонстрирует четкую детализацию.

Эффект «выжигания»

Так как в SID-A50 не используется сцинтиллятор, он не имеет таких проблем, как рассеяние света и эффект «выжигания», присущие детекторам непрямого преобразования.

Временная деградация

На рис. 10 показан коэффициент экранирования рентгеновского излучения кристаллом теллурида кадмия (CdTe) толщиной 1 мм.

Как и в случае с КМОП-фотодиодом, считывающая электроника SID-A50 (ASIC) также уязвима к воздействию рентгеновского излучения. Тем не менее детекторы с покрытием из теллурида кадмия обладают выдающимся коэффициентом экранирования (более 99% при напряжении 120 кВ), что существенно уменьшает повреждения электроники, наносимые рентгеновским излучением. Это, в свою очередь, значительно снижает скорость роста уровня черного в конечном изображении.

Камера SID-A50 не нуждается в калировке, уровень черного автоматически сбрасывается, и качественная картинка сохраняется на протяжении всего периода эксплуатации.

Чувствительность

На рис. 11 приведено сравнение характеристик чувствительности КМОП-матрицы и камеры прямого преобразования SID-A50. Вследствие наивысшей эффективности преобразования SID-A50 имеет примерно в 6 раз более высокую чувствительность, чем КМОП-детектор.

Высокая скорость обработки

Скорость обработки изображения в режиме 1×1 от 2 до 50 кадров/с позволяет получать видеоизображение объекта в реальном времени без потери качества.

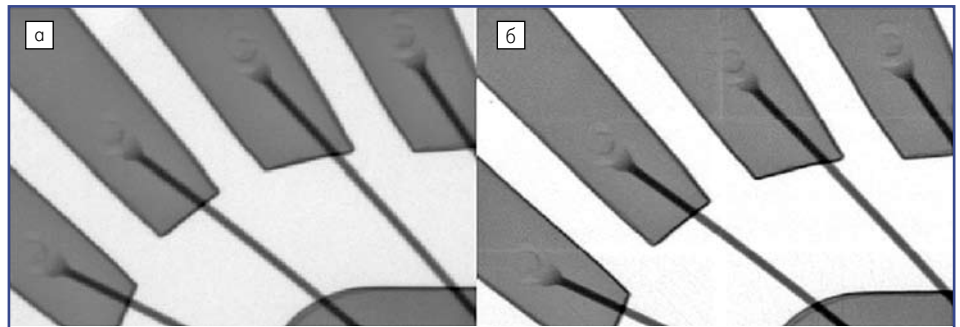


Рис. 9. Сравнение изображений КМОП-детектора и камеры SID-A50: а) КМОП-детектор; б) камера SID-A50

Эксплуатация

Эксплуатация детектора третьего поколения выгодна. Высокое качество изображения, практически неизменное с течением времени, позволяет решать самые сложные задачи инспекции. А длительный срок эксплуатации снизит расходы на техническое обслуживание системы.

В сравнении с КМОП-матрицей SID-A50 может противостоять в 5 раз (!) более высокой дозе излучения.

того, чтобы сделать обоснованный вывод: Pony SID-A50 — это очередной шаг в эволюции детекторов рентгеновского излучения, а значит, и очередной шаг к удобству и успеху пользователей. Более того, внедрение таких камер меняет требования к самим системам рентгеновского контроля. О системах рентгеновского контроля с камерами третьего поколения и преимуществах их использования будет рассказано в следующей статье.

Заключение

Сложно полностью охватить все преимущества этих по-настоящему высокотехнологичных камер в рамках одной статьи. Однако перечисленных достоинств достаточно для

Литература

1. Japan Industries Association of Radiological Systems. Hibaku teigen no tame no ekkususen I. I. rekka suitei shitei shishin no kenkyu chousa. Section 30 of "2002 Report".

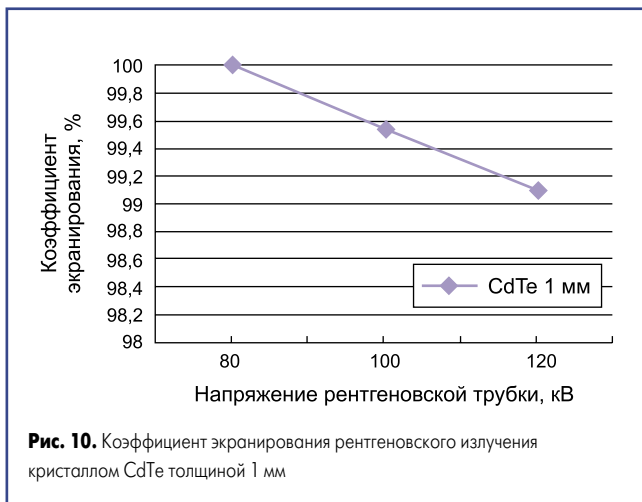


Рис. 10. Коэффициент экранирования рентгеновского излучения кристаллом CdTe толщиной 1 мм

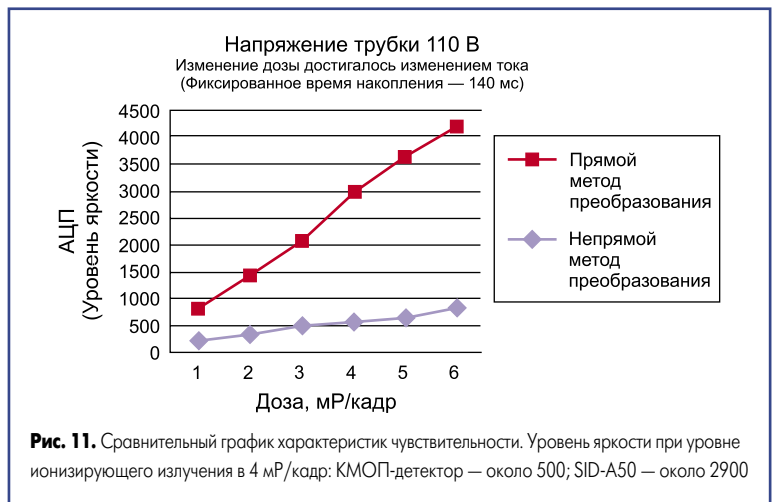


Рис. 11. Сравнительный график характеристик чувствительности. Уровень яркости при уровне ионизирующего излучения в 4 мР/кадр: КМОП-детектор — около 500; SID-A50 — около 2900