

являются панели на основе аморфного селена (aSe) и монокристаллического теллурида кадмия (CdTe). В первом случае сборка тонкопленочных транзисторов (TFT) покрывается аморфным селеном, что позволяет конвертировать рентгеновское излучение напрямую в цифровой сигнал без использования сцинтилляторов или фосфора. Вследствие отсутствия влияния рассеяния и опти-

Технологии формирования и считывания сигналов в ЦДС

Механической основой любого плоскостового детектора является стеклянная подложка, на которую устанавливается считывающая электроника.

TFT-технология

TFT (thin film transistors)-технология используется в основном в панелях на базе

личины пикселя 127 мкм). Отличительной особенностью аморфного кремния является очень высокая радиационная устойчивость, что позволяет применять такие панели при высоких энергиях рентгеновских квантов. Поскольку процесс производства панелей на базе аморфного материала и TFT-технологии требует специфического оборудования и условий производства, такие панели достаточно дороги.



Рис. 3. Плоскостовые детекторы RID 1640 производства компании Perkin Elmer (а) и FlashScan 33 производства компании Thales (б)



Рис. 5. Плоскостовый детектор DIC 100 прямого преобразования на CdTe производства компании Ajat

мального отношения сигнал/шум качество изображения достигает качества, характерного для среднезернистой пленки. Ограничением селенового детектора является узкий диапазон рабочих температур. Как для работы, так и при хранении детектор нужно поддерживать в температурном диапазоне 5 – 30 °С для того, чтобы избежать разрушения селенового слоя. Также при высоких энергиях (> 180 кэВ) селен склонен к образованию фантомных изображений. Все эти ограничения делают возможным применение aSe панелей в очень специфических приложениях, где можно строго контролировать необходимые для этих панелей условия работы. Детекторная система прямого преобразования на основе CdTe свободна от ряда недостатков системы на основе aSe. Она может работать в гораздо более широком температурном диапазоне при энергиях рентгеновских квантов до 300 кэВ, обладая при этом в несколько раз большей чувствительностью. На рис. 5 показан один из типов детекторов прямого преобразования.

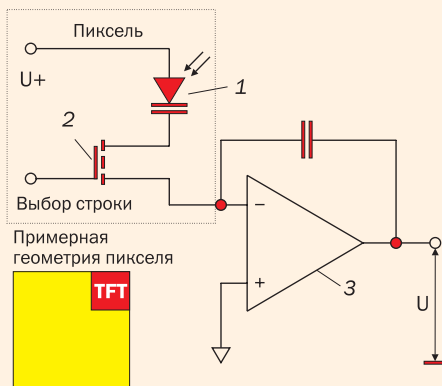


Рис. 6. Схема матрицы TFT-транзисторов: 1 – светодиод; 2 – тонкопленочный (TFT) транзистор; 3 – считывающий усилитель

аморфных кремния или селена. Панели детекторов непрямого преобразования являются типичными сборками фотодиодов на активной TFT-матрице. Для детекторов с прямым преобразованием, детекторный слой располагается прямо на эту матрицу. Матрица TFT-транзисторов представляет собой достаточно простую структуру электронных переключателей (типичная схема для любого типа панелей показана на рис. 6).

Емкость каждого светодиода в исходном состоянии заряжена до напряжения $U+$. При облучении светом она разряжается: чем больше света, тем меньше остаточный заряд. При считывании TFT транзистор открывается, и емкость снова заряжается через считывающий усилитель до значения $U+$. Величина заряда измеряется усилителем считывания и в виде напряжения U подается на аналого-цифровой преобразователь.

Панели могут быть очень больших размеров (40×40 см). Они имеют не очень высокое разрешение (типичное значение ве-

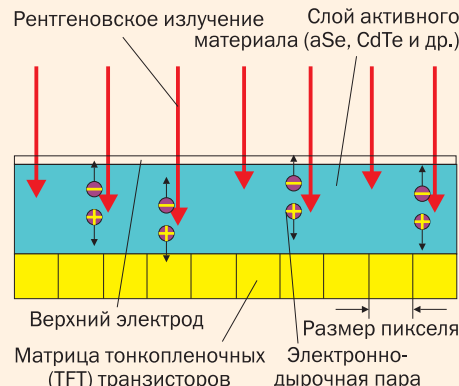


Рис. 4. Схема регистрации рентгеновского излучения плоскостовым детектором прямого преобразования

CCD-технология

CCD (coupled charge device)-технология является одной из ведущих для получения высококачественных рентгеновских изображений. В отличие от матричных панелей типа TFT или CMOS, в CCD панелях считывание сигнала происходит путем транспортировки зарядовых пакетов вдоль кремниевой подложки. Преимуществом таких панелей является низкий шум, высокая чувствительность. Обычно в CCD панелях используют оптоволоконные буферные вставки, позволяющие увеличить площадь приемного окна панели и служащие одновременно защитой от радиации. Но даже с таким дополнительным экранированием CCD панели могут работать только при энергиях рентгеновских квантов < 50 кэВ. Как и в случае с аморфным кремнием, их производство требует специальных условий, поэтому они достаточно дороги.

CMOS-технология

CMOS (complementary metal oxide semiconductor) – эта технология, как и TFT с аморфным кремнием, является матричной сборкой. Основным преимуществом этой технологии перед остальными является использование хорошо развитой промышленной базы производства интегральных схем. Уровень шумов CMOS-панелей приблизился к уровню CCD-панелей, динамический диапазон в несколько раз выше. На CMOS-панелях получено самое высокое пространственное разрешение (размер пикселя несколько микронметров). Стоимость таких

Цифровые рентгенографы

щей пластины. Дополнительные шумы в виде дополнительных пульсаций может вносить также сканер. Структурный шум запоминающей пластины связан с неоднородностями фосфорного слоя, связанными с процессом производства. Этот эффект известен также и для флуоресцентных экранов. При высоких экспозиционных дозах вклад квантового шума рентгеновского излучения невелик

Использовались две геометрии просвечивания: 1) тестовый образец находился непосредственно перед детектором (увеличение 1) и 2) тестовый образец находился между детектором и рентгеновской трубкой (увеличение 3,5). Последняя геометрия требует применения минифокусной трубки, чтобы геометрическая нерезкость на детекторе не превышала 200 мкм. На рис. 10 для сравнения представлены изо-

больше деталей по сравнению с пленкой. Это улучшение качества изображения основано на увеличении SNR_{norm} по сравнению с пленочной технологией. Улучшенное SNR для ЦДС позволяет детектировать элементы с размерами, гораздо меньшими размера пикселя! На рис. 12 показаны два изображения одного и того же участка, полученные на пленке и плоской панели. Слева на пределе раз-

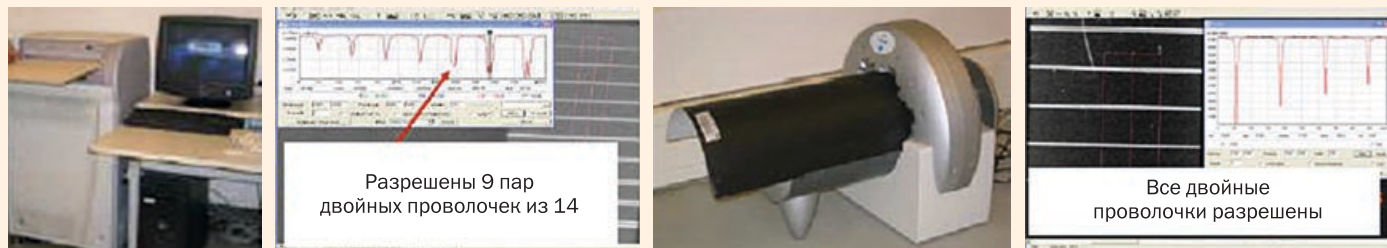


Рис. 8. Примеры КР систем и их измеренные базовые пространственные разрешения: слева – Dynamix XG-1 Fujifilm, $SR_b = 130$ мкм для стандартной КР-системы с ограниченным пространственным разрешением (толстая IP, высокая скорость, IP в жесткой cassette, автоматизированная загрузка, размер пикселя 100μ); справа – система высокого разрешения HD-CR 35 NDT, Dürr, $SR_b = 40$ мкм (ручная загрузка ЗП, разрешение 12μ, тонкая, голубая HD-IP)

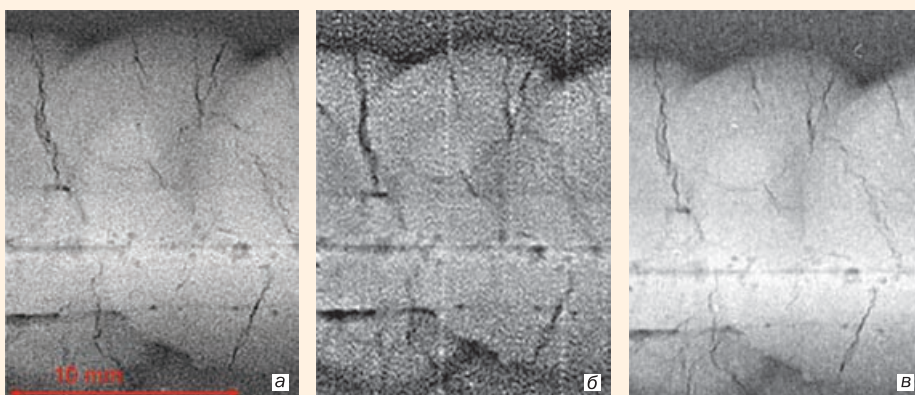


Рис. 9. Сравнение рентгеновских изображений участка тестового образца, полученных: а – на лучшей пленочной системе C1 ($SNR_{norm} = 246$; $SR_b = 40$ мкм); б – на стандартной КР-системе ($SNR_{norm} = 145$; $SR_b = 130$ мкм); в – с помощью системы HD-CR ($SNR_{norm} = 290$; $SR_b = 40$ мкм)

по сравнению с этими структурными шумами, отсюда возникает ограничение качества изображения.

Пример достижимого качества изображения при контроле сварных соединений приведен на рис. 9. Времена экспозиции достаточно высоки, поэтому шум на изображениях определяется структурным шумом самих КР-систем. Очевидно, что стандартная КР-система имеет худшее качество изображения (как значения SR_b , так и SNR_{norm}) по сравнению с лучшей пленочной системой НК, в то время как на HD-CR системе можно получить немного лучший результат, чем на пленочной системе. Согласно EN 14784-2 система HD-CR достигает класса В. Стандартная система не достигает класса А в этом примере.

Качество изображения, достижимое в цифровых детекторных системах

ЦДС-изображения были получены с помощью плоскопанельного детектора XRD 1620 компании Perkin Elmer.

бражения одного и того же участка сварного шва на тестовом образце, полученных на пленке и с применением ЦДС.

Из чисто визуального сравнения двух изображений следует, что качество изображения, полученного с помощью плоской панели, выше при гораздо меньших дозовых нагрузках. Для более детального исследования было проведено сравнение изображений (рис. 11) одного и того же участка тестового образца (область шириной 12 мм с выявленными трещинами), приведенных к одному размеру при разных значениях увеличения (увеличение пленочного изображения регулировалось с помощью оцифровщика).

Значительное увеличение SNR_{norm} в ЦДС-технологии позволяет даже при увеличении 1 и базовом пространственном разрешении 200 мкм выявлять микротрещины, которые на пленке (с гораздо лучшим $SR_b \approx 50$ мкм) находятся на уровне шумов. При увеличении 3,5 (рис. 11, правое изображение, предполагаемое $SR_b = 70$ мкм) можно различить гораздо

личима проволока W16, справа – W19 (50 мкм) при размере пикселя 200 мкм! Этот эффект называется субпиксельным разрешением. Недостаточное SR_b компенсируется высоким SNR

Как уже упоминалось, максимально достижимое значение SNR_{norm} для пленочной системы наивысшего класса ограничено максимальным рабочим диапазоном негатоскопов и оцифровщиков с максимальным значением плотности почернения $D = 4,7$. Это также ограничивает максимально возможную дозу облучения. Более высокие значения SNR_{norm} (больше 250) потребуют больших экспозиционных доз. Но пленки в принципе не читаемы при плотностях $D > 5$. В случае КР-систем качество изображения ограничено их структурным шумом. Максимальное значение SNR_{norm} для современных КР-систем пока не может быть выше 300. Эти ограничения SNR_{norm} для пленочных и КР-систем преодолеваются для ЦДС следующим образом: перед насыщением ЦДС-изображение может быть считано, ЦДС обнулена и может быть начат новый цикл экспозиции. Все изображения, полученные в таких циклах, могут усредняться в компьютере с получением окончательного усредненного изображения. Таким образом, время экспозиции может увеличиваться без какого-либо предела.

SNR_{norm} будет увеличиваться как квадратный корень из числа усредненных изображений и/или как квадратный корень дозы. Время экспозиции такого цикла может продолжаться без какого-либо технического предела. SNR_{norm} будет линейно расти как квадратный корень дозы (эквивалентно времени экспозиции или количеству усредненных изображений). В [3] проведен детальный расчет SNR_{norm} при различных условиях просве-

чивания для детектора DIC100TL компании Ajat. Получены значения SNR_{norm} до нескольких тысяч.

Однако такие высокие значения SNR_{norm} обычно не достигаются в радиографической практике. Существуют практические ограничения: отклонения в чувствительности отдельных пикселей ЦДС ограничивают достижимое значение SNR на изображении. Не может быть

структурного шума ЦДС. По сравнению со «стандартной калибровкой», предусматривающей однократную компенсацию в условиях вывода сигнала и усиления изображения, можно произвести многократную корректировку усиления, приводящую к гораздо большему увеличению SNR_{norm} за счет компенсации различий между отдельными пикселями. Таким образом, для ЦДС с

структурного шума детектора уже после калибровки, или в неоднородности материала самого объекта контроля. По той же причине наступает ограничение минимального детектируемого значения изменения толщины материала в процентах от толщины объекта. Эта контрастная чувствительность ограничена значением 0,1 %, что соответствует SNR_{norm} примерно 1000. Увеличение времени экспози-

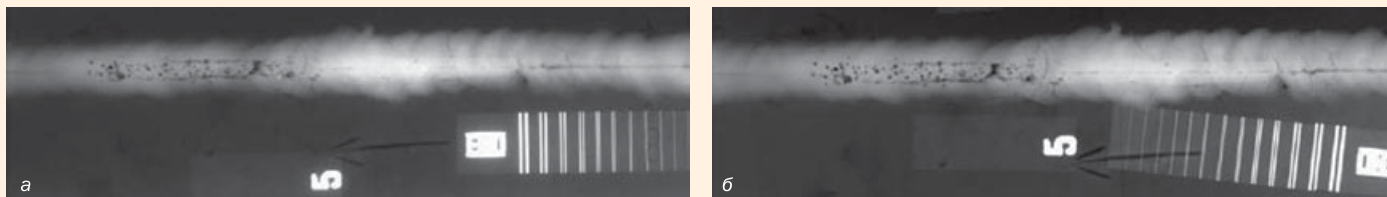


Рис. 10. Изображения сварного шва тестового образца (увеличение 1); а – оцифрованное на системе Primescan 7100 согласно стандарту EN ISO 14096 с лучшей пленочной системы класса C1 в соответствии со стандартом EN 584-1 (150 кВ, 5 мА, фокусное расстояние 1000 мм, время экспозиции 330 с); б – полученное с помощью плоскопанельного детектора XRD 1620 фирмы Perkin Elmer (геометрия 1, 160 кВ, 6,2 мА, фокусное расстояние 1000 мм, время экспозиции 60 с

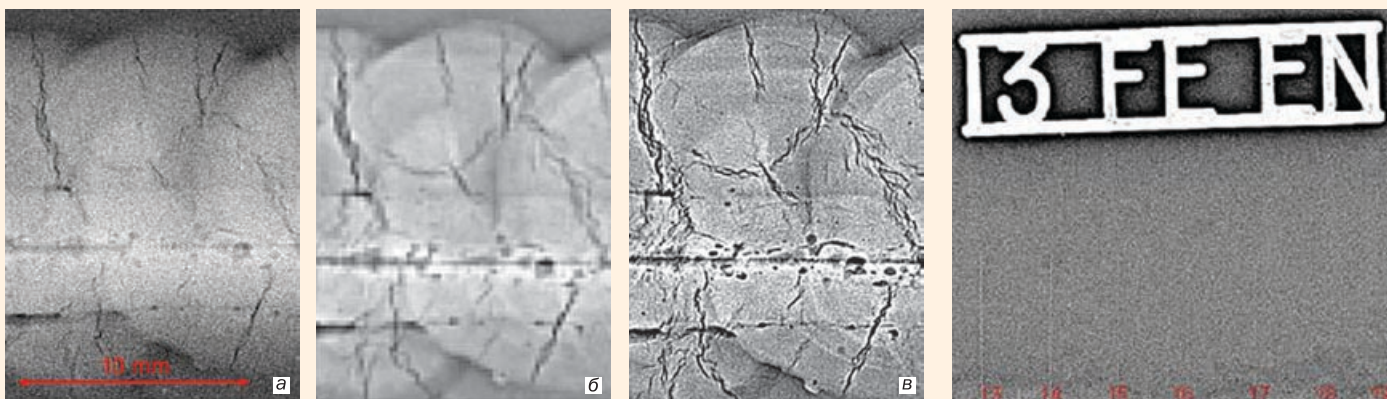


Рис. 11. Сравнение качества изображения: а – на пленке класса C1; б – ЦДС (без увеличения, размер пикселя 200 мкм); в – ЦДС с проекционным увеличением 3,5

достигнуто какого-либо дальнейшего улучшения SNR_{norm} , если пуассоновский шум рентгеновских квантов уменьшили в результате многократного усреднения до уровня ниже разницы между соседними пикселями. SNR_{norm} ограничено структурным шумом детектора. Здесь та же самая причина, что и в КР.

Однако ЦДС имеет существенное преимущество перед КР, о котором говорилось в разделе «калибровка»: пиксели цифровой детекторной системы расположены в матрице, их положение фиксировано в процессе экспозиции и считывания. Поэтому небольшие отличия между пикселями (в чувствительности или в условиях вывода сигнала) приемлемы и могут быть точно измерены. Поскольку эти изменения стабильны во времени, возможна компенсация разницы между различными пикселями с помощью соответствующего программного обеспечения в процессе калибровки.

Такая калибровка ЦДС является ключом к улучшению контрастной чувствительности и высокому отношению сигнал/шум вследствие уменьшения

помощью хорошей калибровки можно преодолеть ограничения на величину SNR_{norm} , существующие для пленочной и КР-технологий.

Преимущество калибровки состоит не только в увеличении SNR, но и в уменьшении времени экспозиции. Требуемое качество изображения определяет необходимое время накопления. По сравнению с однократной калибровкой адаптивная многократная калибровка позволяет получить изображение с тем же самым отношением сигнал/шум за гораздо меньшее время накопления. Авторы [3] исследовали достижимые значения SNR_{norm} при различных видах калибровки для детектора Hamamatsu, C7942 (экспозиция при 120 кВ, 7 мА, фильтр – 30 мм Al). Показано, что если задача требует, чтобы SNR было 500, то этого можно достичь за 250 с при однократной калибровке и всего за 15 с при многократной.

Показано также, что реальные значения SNR_{norm} (в отличие от расчетных) ограничены. Все кривые достигают насыщения. Причина этого или в наличии

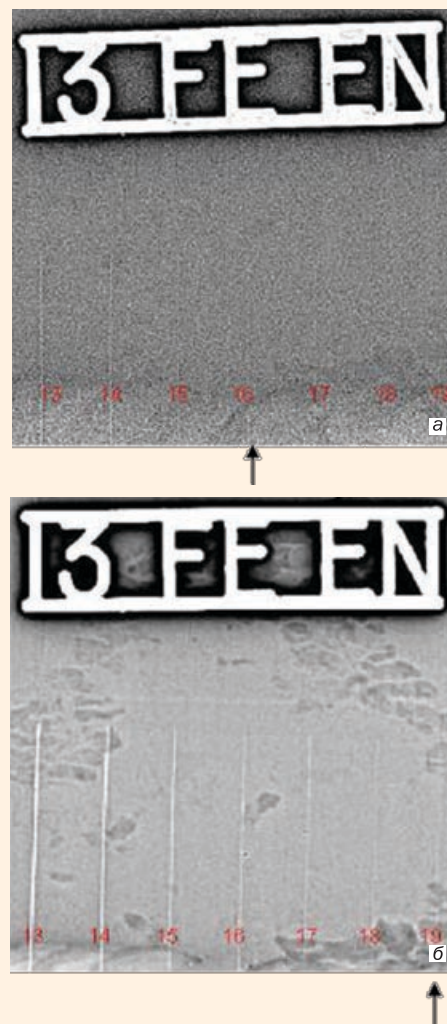


Рис. 12. Сравнение качества изображения по проволочному индикатору согласно стандарту EN 462-1 для пленки (а) и ЦДС-системы (б) при толщине 8 мм (изображения получены с применением фильтра для лучшей визуализации).

ции от 60 до 600 с изменяет ситуацию очень незначительно. Таким образом, цифровые детекторные системы позволяют проводить НК с гораздо лучшей

Цифровые радиостереоки
визуализация

