



СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В. А. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ¹, Р. О. ПАСТОВЕНСКИЙ², Д. С. ШИЛО²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Обзор посвящен наиболее применяемым современным системам радиационного неразрушающего контроля. Предложена классификация радиационных систем неразрушающего контроля. Рассмотрены как традиционные системы с промежуточными носителями информации (пленочная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография), так и перспективные цифровые системы реального времени без промежуточных носителей информации. Библиогр. 26, табл. 8, рис. 13.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, флэш-радиография, цифровая радиография, рентгенотелевизионная система, рентгеновский электронно-оптический преобразователь, сцинтилляционный экран, ПЗС-матрица, плоскпанельный детектор

Среди методов неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий значительное место занимает радиационный контроль с использованием рентгеновского и гамма-излучения. Радиационные методы НК применимы к изделиям из любых материалов и превосходят полнотой информации о дефектах (тип, форма, размеры, место расположения) другие виды НК: магнитный, акустический, вихретоковый и др. Радиационным методам и системам отдают предпочтение при контроле качества сварных и паяных соединений; контроле качества литья, газо- и нефтепроводов; элементов и конструкций автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта; агрегатов химического и энергетического машиностроения.

В последние годы произошли качественные изменения в системах радиационного НК прежде всего благодаря появлению новых многоэлементных полупроводниковых детекторов радиационных изображений, а также интенсивному внедрению цифровых технологий получения, обработки и анализа изображений. При использовании таких детекторов и цифровых технологий ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые затем оцифровываются, обрабатываются и используются для формирования цифрового изображения контролируемого объекта. Цифровое изображение объекта содержит информацию о его внутренней структуре и может формироваться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени. Такой метод радиационного контроля называют цифровой радиографией или флэш-радиографией [1–3].

Отличительной особенностью флэш-радиографии является отсутствие промежуточных носителей информации (радиографических пленок, полупроводниковых селеновых пластин, запоминающих пластин с фотостимулируемой памятью), которые требуют длительных операций экспонирования, обработки и считывания информации. Соответственно отсутствие таких промежуточных носителей позволяет значительно повысить производительность и снизить стоимость радиационного контроля.

Целью данной статьи является обзор применяемых в настоящее время систем радиационного НК. Рассмотрены как традиционные системы с промежуточными носителями информации, так и новые перспективные системы для цифровой радиографии.

Классификация систем радиационного НК. Системы радиационного НК состоят из трех основных частей: источника ионизирующего излучения, контролируемого объекта и детектирующего устройства. В зависимости от типа применяемого детектирующего устройства системы радиационного НК можно классифицировать следующим образом (рис. 1): системы с промежуточными носителями информации и системы реального времени без промежуточных носителей информации. Системы с промежуточными носителями называют также системами с запоминанием изображения.

В системах с запоминанием изображения радиационное изображение детектируется и запоминается на каком-либо носителе (радиографическая пленка, электрорадиографическая пластина, запоминающая пластина с фотостимулируемой памятью). Такие системы могут выполнять радиационный контроль только неподвижных объектов.

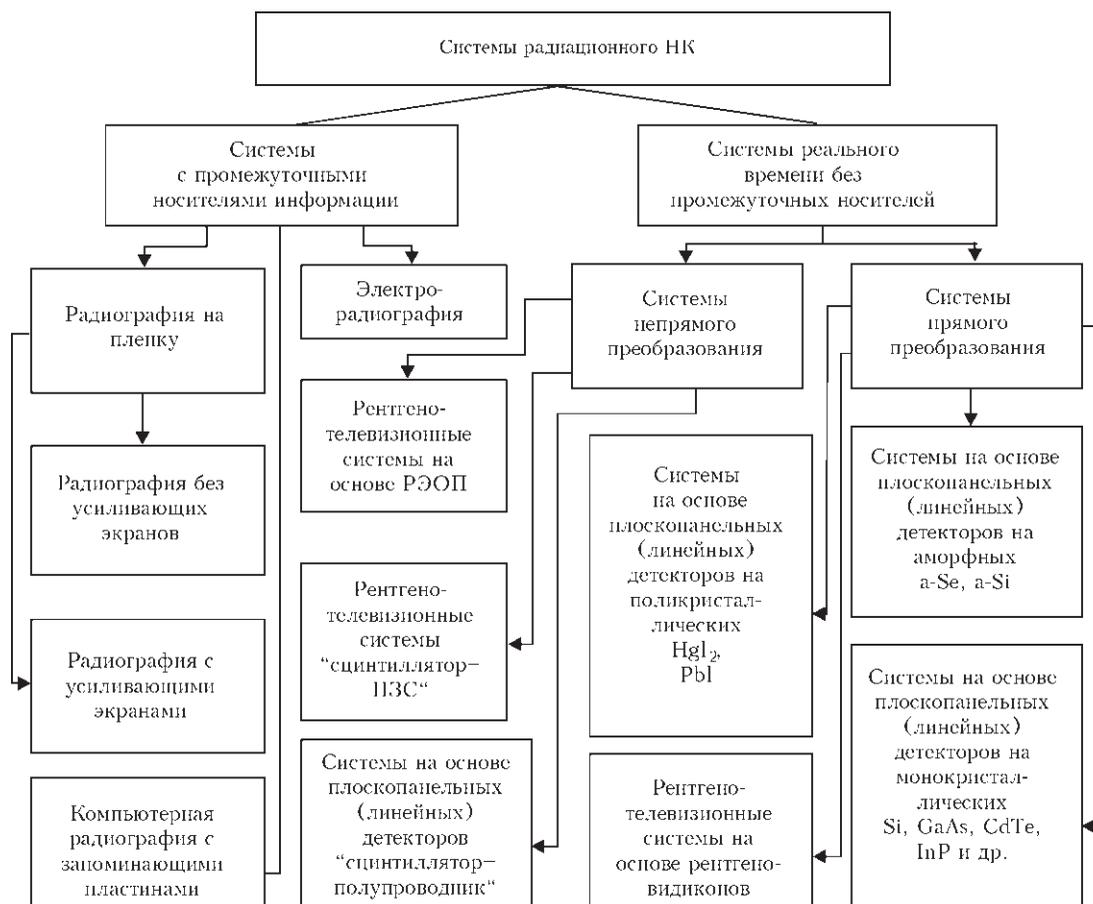


Рис. 1. Классификация систем радиационного НК

Системы реального времени без промежуточных носителей информации позволяют выполнять радиационный контроль как неподвижных, так и подвижных объектов в реальном времени.

К системам с промежуточными носителями информации относятся пленочная радиография, электрорадиография и компьютерная радиография на основе запоминающих пластин.

Радиографические системы на основе пленки. Радиографическая пленка до сих пор является наиболее широко используемым детектором ионизирующего излучения с большим содержанием серебра (5...10 г/м²). Изображение контролируемого объекта формируется на пленке, представляющей собой прозрачную основу с нанесенным на нее желатином с суспензией кристаллов галогенида серебра (AgBr). После просвечивания проводится химическая обработка пленок и считывание информации, компьютерная обработка информации, утилизация пленок с целью регенерации серебра. К достоинствам пленочной радиографии следует отнести высокую относительную чувствительность контроля (1 %) в широком диапазоне толщин контролируемых объектов, высокую разрешающую способность (20 пар лин./мм), большой размер рабочего поля, возможность получения в результате контроля документа и т.д.

Радиографические пленки делят на два класса: предназначенные для использования без усиливающих экранов и пленки для использования с усиливающими экранами. Параметры некоторых безэкранных и экранных пленок приведены соответственно в табл. 1 и 2 [4].

Наиболее существенным отличием между различными пленками является размер зерна кристаллов галогенида серебра. Пленки, использующиеся без усиливающих экранов, дают более качественное изображение, но из-за малого размера зерна нуждаются в больших дозах излучения. Чувствительность отечественных пленок принято характеризовать обратной величиной экспозиционной дозы излучения, выраженной в рентгенах, которая необходима для превышения оптической плотности почернения пленки на 0,85 ед. над плотностью неэкспонированной пленки (вуали).

Импортные пленки характеризуют относительным экспозиционным фактором по отношению к определенной пленке, принятой за эталон. Среди пленок марки STUCTURIX фирмы «Agfa-Gevaert» (Бельгия) такой эталонной является пленка D7 (табл. 1). Пространственная разрешающая способность радиографических пленок может достигать 20 пар лин./мм.

Усиливающие экраны подразделяют на металлические, флуоресцентные и флуорометалличе-



Таблица 1. Радиографические пленки, используемые без усиливающих экранов

| Тип пленки | Фирма (страна) | Чувствительность | | Коэффициент контрастности |
|---------------|------------------------|------------------|------------|---------------------------|
| | | P^{-1} | Отн. ед. | |
| PT-1 | ОАО «ТАСМА» (Россия) | 25,0...27,0 | – | 4,2...4,4 |
| PT-1B | – « – | 35,0...37,0 | – | 4,0...4,1 |
| PT-K | – « – | 6,0...7,0 | – | 4,5...4,7 |
| PT-7T | – « – | 8,0...9,0 | – | 4,7...4,9 |
| STUCTURIX D2 | Agfa-Gevaert (Бельгия) | 1,2...1,5 | 0,1...0,12 | 5,8...6,0 |
| STUCTURIX D3 | – « – | 2,0...2,5 | 0,2–0,25 | 5,0...5,5 |
| STUCTURIX D4 | – « – | 3...4 | 0,3...0,4 | 5,0...5,4 |
| STUCTURIX D5 | – « – | 5...7 | 0,6...0,7 | 5,0...5,4 |
| STUCTURIX D7 | – « – | 10...12 | 1 | 4,9...5,4 |
| STUCTURIX D8 | – « – | 15...18 | 1,5 | 4,3...4,8 |
| STUCTURIX D6R | – « – | 18...20 | 1,8...2,0 | 4,2 |
| IX 80 | FUJIFILM (Япония) | 4...5 | 0,4...0,5 | 5,5 |
| IX 100 | – « – | 10...12 | 1 | 5,2 |
| IX 150 | – « – | 15 | 1,5 | 4,8 |
| AA400 | Kodak (США) | 10...12 | 1 | 4,3 |
| T200 | – « – | 6...7 | 0,6 | 6 |
| MX125 | – « – | 4...5 | 0,4...0,5 | 6 |
| INDUX R5 | Foma Bohemia (Чехия) | 6...7 | 0,7 | 5,5...5,9 |
| INDUX R7 | – « – | 10...12 | 1 | 5,0...5,4 |

ские. Усиливающее действие металлических экранов основано на дополнительном экспонировании пленки вторичными электронами, выбитыми ионизирующим излучением из тонкой свинцовой или свинцово-оловянной фольги металлического экрана. Эти электроны практически полностью поглощаются пленкой, повышая ее плотность почернения. Коэффициент усиления металлических экранов, равный отношению длительности экспозиции без экрана и с ним, может достигать до 2,0...2,5. Совместно с пленкой обычно используют пару экранов, размещая их по обе стороны пленки.

Усиливающее действие флуоресцентных экранов основывается на преобразовании люминофором экрана части ионизирующего излучения в оптическое. Пленка поглощает приблизительно 1 % рентгеновского излучения, достигающего к ней, в то время как рентгеновский экран поглощает значительно большую его часть (до 20 %), а свечение экрана почти полностью поглощается пленкой. Благодаря этому значение коэффициента усиления таких экранов достигает нескольких десятков и больше, соответственно значительно сокращается время экспозиций. Однако значительное уменьшение времени экспозиции при использовании

флуоресцентных экранов сопровождается потерей разрешающей способности системы экран-пленка. Основной причиной этого является большой размер зерна люминофора. Средний размер зерна безэкранной пленки составляет порядка 0,5 мкм, экранной пленки 1...1,5 мкм, а размер зерна флуоресцентных экранов равен около 10 мкм, т.е. приблизительно на порядок больше.

Наиболее распространенные флуоресцентные экраны на основе вольфрамата кальция $CaWO_4$ сейчас вытесняются более эффективными экранами на основе оксисульфидов гадолиния, лантана, иттрия. Используются они в комплекте, состоящем из двух экранов – переднего и заднего. Обычно задний экран имеет большую толщину.

Флуорометаллические экраны сочетают в себе слой свинцовой фольги со слоем люминофора, т.е. являются комбинацией металлического и флуоресцентного экранов. Такие экраны дают существенное снижение времени экспозиции пленки, незначительно ухудшая ее разрешающую способность. Параметры некоторых флуоресцентных и флуорометаллических усиливающих экранов приведены в табл. 3.

Усиливающие экраны вместе с пленкой пакуют в гибкие светонепроницаемые кассеты с карманами

Таблица 2. Радиографические пленки, используемые с усиливающими экранами

| Тип пленки | Фирма (страна) | Чувствительность, P^{-1} | Средний градиент | Примечание |
|---------------|------------------------|----------------------------|------------------|----------------|
| PT-1 | ОАО «ТАСМА» (Россия) | – | 2,0...2,5 | С экраном ВП-1 |
| STUCTURIX F8 | Agfa-Gevaert (Бельгия) | 50...300 | 4,6 | С экраном RCF |
| STUCTURIX D6R | – « – | 30...100 | 6,0 | – « – |
| IX 100HD | FUJIFILM (Япония) | 11 | 4,1 | Без экрана |
| HS800 | Kodak (США) | 18...20 | 4,3 | – « – |
| FOMADUX RX-8 | Foma Bohemia (Чехия) | 16...18 | 4,6...4,8 | – « – |

Таблица 3. Флуоресцентные и флуорометаллические усиливающие экраны

| Тип экрана | Люминофор | Коэффициент усиления | Фирма (страна) |
|----------------|------------------------------------|--|------------------------|
| ЭУ-В1 | CaWO ₄ | 30 | Россия |
| ЭУ-В2 | - « - | 40 | - « - |
| ЭУ-В3 | - « - | 50 | - « - |
| ВП-1 | - « - | 80...100 | - « - |
| ВП-2 | - « - | 130...160 | - « - |
| ЭУ-И1 | Y ₂ O ₂ S-Tb | 50 | - « - |
| RCF | CaWO ₄ | 5...30 | Agfa-Gevaert (Бельгия) |
| Kyokko SMP-308 | - « - | 16...24 для безэкранных пленок; 105...165 для экранных пленок | Kasei Optonix (Япония) |

для маркирующих знаков, эталонов. Пространственная разрешающая способность радиографических систем экран-пленка составляет 8...10 пар лин./мм.

Технологический процесс пленочной радиографии включает следующие процедуры: зарядка кассет, просвечивание контролируемого объекта и экспонирование пленки, химическая обработка пленки, ее сушка, анализ результатов с помощью негатоскопа, компьютерное сканирование, утилизация отходов. Поэтому пленочная радиография наиболее трудоемка, имеет малую производительность и высокую стоимость. Объемы применения пленочной радиографии с каждым годом уменьшаются в связи с появлением и совершенствованием новых систем детектирования радиационных изображений.

Электрорадиография. Относительно недавно много надежд возлагалось на электрорадиографию или ксерорадиографию [5]. При проведении электрорадиографического контроля используют полупроводниковые селеновые пластины, состоящие из металлической алюминиевой подложки, на которую в вакуумных условиях путем термического испарения нанесен слой фотополупроводника – аморфного селена. Толщина селенового слоя составляет 100...500 мкм.

Процесс получения электрорадиограммы состоит из следующих этапов. Для придания пластине с полупроводниковым слоем чувствительности на поверхность слоя наносится равномерный по площади электрический заряд. В процессе нанесения заряда высокое напряжение (5...7 кВ) подводится к электродам, размещенным над пластиной. В воздушном промежутке между электродами и слоем селена возникает коронный разряд. Образовавшиеся в процессе разряда ионы воздуха оседают на селеновом слое. В зависимости от полярности напряжения, подаваемого на электроды, на поверхность селенового слоя может быть нанесен либо положительный, либо отрицательный потенциал относительно подложки. После зарядки пластину закрывают светонепроницаемым кожухом и она готова к экспонированию.

Экспонирование заряженной пластины осуществляется ионизирующим излучением, прошедшим через контролируемый объект. Взаимодействуя с

селеновым слоем, излучение генерирует свободные носители заряда (электронно-дырочные пары) и уменьшает его электрическое сопротивление. В результате уменьшения сопротивления нейтрализуется заряд, нанесенный на слой. Причем нейтрализация заряда в первом приближении пропорциональна интенсивности излучения, взаимодействующего с пластиной. В результате на поверхности фотополупроводникового слоя образуется скрытое электростатическое изображение, которое проявляется при опылении поверхности селенового слоя мелкодисперсным заряженным порошком – электрографическим проявителем. Интенсивность оседания порошка на пластине также пропорциональна значению остаточного заряда.

Далее проявленное видимое порошковое изображение переносят на другой носитель (обычно бумагу), который используют для анализа и хранения электрорадиограммы. Электрорадиографическое изображение, как и изображение на пленке, может быть отсканировано, обработано и проанализировано с помощью компьютерных программ.

Преимуществами электрорадиографии перед пленочной радиографией являются:

- большая контрастность, резкость и лучшее отношение сигнал/шум электрорадиограмм;
- получение электрорадиограммы всего за несколько минут;
- отсутствие необходимости в фотолаборатории;
- одна селеновая пластина может использоваться до 1000 раз;
- меньшая стоимость контроля.

Компьютерная радиография на основе запоминающих пластин. В компьютерной радиографии для получения изображения вместо пленки применяются специальные запоминающие пластины многократного пользования [6]. Для запоминания изображений в пластине использован люминофорный слой с фотостимулируемой памятью – сложное химическое соединение. Чаще всего используются соединения типа BaFBr_{x-1-x}:Eu²⁺. На рис. 2 приведена структура запоминающей пластины фирмы «GE Sensing & Inspection Technologies».

Во время экспонирования пластины, размещенной за контролируемым объектом, под дей-

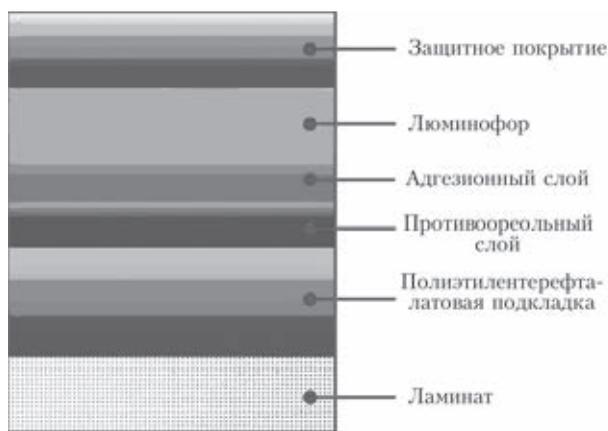


Рис. 2. Структура запоминающей пластины фирмы «GE Sensing & Inspection Technologies»

ствием ионизирующего излучения электроны внутри слоя с фотостимулируемой памятью возбуждаются и захватываются на энергетические уровни (ловушки), на которых могут находиться в течение длительного времени.

После экспонирования пластину вставляют в специальный сканер, в котором она сканируется лазерным пучком [7]. Схема процесса сканирования запоминающей пластины и получения цифрового изображения показана на рис. 3. При сканировании пластины лазерным пучком электроны высвобождаются из ловушек, что сопровождается эмиссией видимого света, длина волны которого отличается от длины волны излучения сканирующего лазера. Этот свет собирается фотоприемником (фотоумножителем) и преобразу-

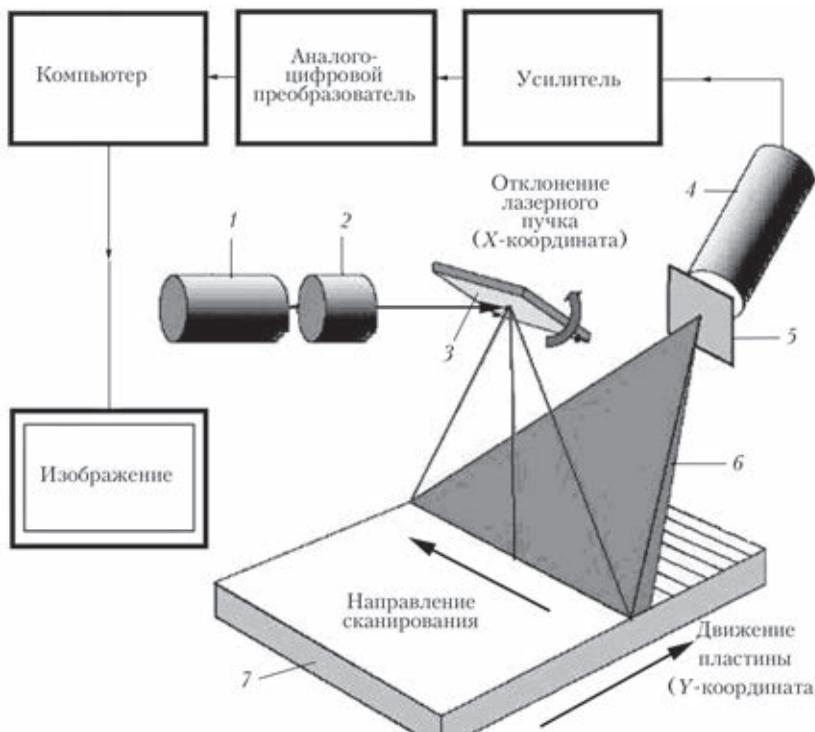


Рис. 3. Схема процесса сканирования запоминающей пластины и получения цифрового изображения: 1 – лазер; 2 – оптическая система формирования пучка; 3 – зеркало; 4 – фотоумножитель; 5 – фильтр; 6 – оптическая система сбора света люминесценции; 7 – запоминающая пластина

ется в электрический сигнал. После его усиления и аналого-цифрового преобразования компьютер формирует на экране монитора цифровое изображение контролируемого объекта.

Поскольку считывание скрытого изображения, сформированного на запоминающей пластине во время ее экспонирования, возможно лишь с использованием компьютерной техники, радиационный контроль с помощью таких систем получил название компьютерной радиографии.

Отличие запоминающих пластин от радиографической пленки – возможность их многократного использования (несколько тысяч раз без потери качества). Пластины совместимы с источниками ионизирующего излучения, имеющих энергию от 10 кэВ до 20 МэВ (рентгеновские аппараты непрерывного действия и импульсные, бетатроны, радиоизотопные источники) [8].

Запоминающие пластины гибкие и подобно пленке могут принимать форму контролируемого объекта. Из процесса компьютерной радиографии исключена химическая обработка пленки, время получения изображения составляет от 1...2 мин. Изображения сохраняются в электронном виде и могут подвергаться цифровой обработке с целью улучшения выявления дефектов.

По динамическому диапазону компьютерная радиография превосходит пленочную, что позволяет выполнять контроль объектов с большим перепадом толщин за одну экспозицию.

Компьютерная радиография обеспечивает относительную чувствительность контроля, соизмеримую с пленочной радиографией, а разрешающую способность – до 20 пар лин./мм. К недостаткам таких систем можно отнести высокую стоимость комплекта оборудования для компьютерной радиографии, а также невозможность выполнять контроль в реальном времени.

Системы реального времени без промежуточных носителей (рис. 1) позволяют выполнять радиационный контроль как неподвижных, так и подвижных объектов в реальном времени. Они подразделяются на системы прямого и прямого преобразования.

В системах прямого преобразования теневое радиационное изображение с помощью сцинтилляционных экранов преобразуется вначале в световое, которое затем преобразуется в электрический сигнал. Далее электрический сигнал используется для

формирования выходного изображения системы НК. В системах прямого преобразования теневого радиационное изображение непосредственно преобразуется в электрический сигнал, который используется для формирования выходного изображения.

Отсутствие промежуточных носителей информации, затратных материалов, дополнительного оборудования и операций, с ними связанных, снижает расходы на радиационный контроль с помощью таких систем и значительно повышает его оперативность.

Рентготелевизионные системы на основе рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП). В таких системах преобразователем рентгеновского излучения в видимое является РЭОП, который одновременно выполняет функции усилителя яркости изображений.

Рентгеновский электронно-оптический преобразователь представляет собой электровакуумный прибор с остаточным давлением $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст., схема которого приведена на рис. 4. На входе РЭОП расположен экранно-катодный узел, состоящий из сцинтилляционного экрана 1 и находящегося с ним в оптическом контакте фотокаатода 2. Экран 1 преобразует теневого рентгеновского изображение в видимое. Фотокаатод 2 под действием световых фотонов за счет внешнего фотоэффекта испускает электроны, которые ускоряются и фокусируются электронно-оптической системой РЭОП. Электронно-оптическая система образована электродами 3 – 5, на которые относительно экранно-катодного узла подаются определенные высокие напряжения. Ускоренные и сфокусированные электроны бомбардируют выходной экран 6, изготовленный из мелкозернистого люминофора и расположенного на внутренней стороне выходного окна РЭОП. В результате такой бомбардировки электронами люминофорный экран 6 преобразует электронное изображение в видимое изображение высокой яркости. Преобразование входного рентгеновского изображения в выходное сопровождается уменьшением его размера приблизительно в 10 раз. Таким образом, в РЭОП имеет место тройное преобразование изображения: рентгеновского в видимое, видимого в электронное и электронного вновь в видимое.

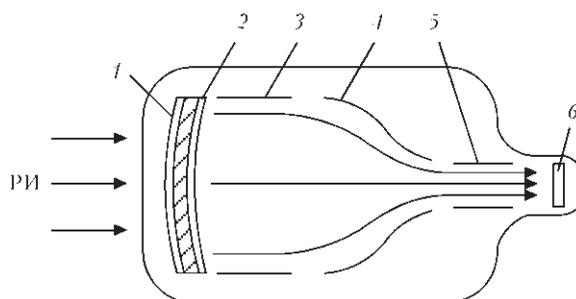


Рис. 4. Рентгеновский электронно-оптический преобразователь: 1 – сцинтилляционный экран; 2 – фотокаатод; 3–5 – электроды электронно-оптической системы; 6 – выходной экран; РИ – рентгеновское излучение

Диаметр рабочего поля различных типов РЭОП составляет от 120 до 400 мм. Диаметр выходного экрана составляет 20, 25, 30 или 35 мм. Входные сцинтилляционные экраны у современных РЭОП изготавливают в основном из иодида цезия CsI. Для улучшения взаимного спектрального соответствия фотокаатода и экрана CsI в качестве активатора в него вводят натрий. Параметры некоторых современных РЭОП приведены в табл. 4 [9–11].

Изображение, сформированное на выходном экране РЭОП, с помощью оптической системы переносят на вход преобразователя свет-сигнал телевизионной камеры. В качестве преобразователей свет-сигнал в современных телевизионных камерах применяются матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), а также КМОП-сенсоры. Электрический видеосигнал с выхода телевизионной камеры подают на телевизионный монитор, на котором воспроизводится рентготелевизионное изображение контролируемого объекта, а также в компьютер для обработки, анализа и архивирования изображений.

Рентготелевизионные системы на основе РЭОП и телевизионной камеры широко применяются для НК объектов, движущихся со скоростью до 3 м/мин. Относительная чувствительность контроля таких систем составляет 2...3 %, разрешающая способность – 3...5 пар лин./мм.

Недостатками систем на основе РЭОП являются высокая стоимость, большие габариты и масса, относительно небольшой размер рабочего поля, чувствительность к вибрациям и ударам.

Рентготелевизионные системы «сцинтилятор-ПЗС». Такие системы имеют ряд преимуществ.

Таблица 4. Параметры современных РЭОП

| Параметр | РЭОП | | |
|---|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| | Thales TH 9447 QX (16") | Siemens HIDEQ 33-4 ISX (13") | ФИЛИН 16Н2048М (16") |
| Диаметр входного окна, мм | 400 | 380 | 406 |
| Эффективный диаметр входного окна, мм | 360 | 330 | 360 |
| Коэффициент преобразования, (кд/м ²) / (мР/с) | 350 | 418 | – |
| Разрешающая способность, пар лин./мм | 4,6 | 4,0 | 4,2 |
| Диаметр выходного окна, мм | 35 | 25 | 35 |
| Масса, кг | 36 | 25...27 | 43 |



ществ перед системами на основе РЭОП: возможность смены скintилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры системы; простота конструкции; малые габариты и масса; низкая стоимость и др. Схема рентгенотелевизионной системы «сцинтиллятор–ПЗС» приведена на рис. 5.

Сцинтилляционный экран преобразует тене-вое рентгеновское изображение контролируемого объекта в видимое. Перенос видимого изображения с экрана на ПЗС-матрицу телевизионной камеры происходит с поворотом на 90° , поскольку оптическая система состоит из объектива и зеркала. Для защиты от прямого рентгеновского излучения, которое может приводить к деградации ПЗС-матрицы, телевизионная камера заключена в защитный свинцовый экран.

В качестве сцинтилляционного экрана в таких системах применяют монокристаллические экраны на основе иодида цезия, активированного таллием CsI(Tl), и порошковые экраны на основе оксисульфида гадолиния, активированного тербием $Gd_2O_2S(Tb)$.

Из-за низкой яркости свечения сцинтилляционных экранов в телевизионных камерах таких систем необходимо применять высокочувствительные ПЗС-матрицы [12]. Пригодны, например, ПЗС-матрицы с микролинзами фирмы «Sony» (технология EXview HAD CCD). Для повышения относительной чувствительности контроля и уменьшения шумов на изображении применяют режим длительного накопления изображений на ПЗС-матрице [13]. Перевод ПЗС-матриц в режим длительного накопления изображений, наряду с повышением чувствительности, позволяет использовать для просвечивания объектов малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты [14]. Увеличение возможных длительностей накопления изображений возможно за счет охлаждения ПЗС-матриц с помощью элементов Пельтье.

Относительная чувствительность контроля рентгенотелевизионных систем «сцинтиллятор–ПЗС» соответствует чувствительности пленочной радиографии. Разрешающая способность

таких систем, зависящая от разрешающей способности экрана и ПЗС-матрицы, а также размера рабочего поля, составляет 2...10 пар лин./мм.

Для увеличения размера рабочего поля и разрешающей способности таких систем необходимо применять ПЗС-матрицы больших размеров с большим количеством пикселей, что приводит к увеличению габаритов, массы и стоимости таких систем. Увеличение габаритов и стоимости таких систем обусловлено также сложностью изготовления светосильных объективов для ПЗС-матриц больших размеров.

Для преодоления указанных трудностей было предложено считать изображение со сцинтилляционного экрана несколькими ПЗС-матрицами (от 4 до 88). Каждая ПЗС-матрица (сенсор) формирует частичное (парциальное) изображение. Изображения от каждого отдельного сенсора при обработке сшиваются и формируется результирующее изображение объекта. Такая многосенсорная технология позволила создать относительно недорогие и оптимальные по параметрам рентгеновские детекторы [15]. Конструкция такого многосенсорного рентгеновского детектора, разработанного научно-производственным объединением «Телеоптик» (г. Киев) приведена на рис. 6.

В табл. 5 приведены параметры многосенсорных рентгеновских детекторов НПО «Телеоптик» [16]. Основными преимуществами таких детекторов является большое рабочее поле, которое может составлять 432×432 мм, а также высокая разрешающая способность (до 7 пар лин./мм).

Системы на основе плоскочелпанельных детекторов. В последние годы разработаны плоскочелпанельные матричные детекторы ионизирующего излучения на основе полупроводниковых структур (см. рис. 1). В детекторах непрямого преобразования (типа «сцинтиллятор–полупроводник») используется промежуточное преобразование ионизирующего излучения в видимое. В детекторах прямого преобразования ионизирующее излучение непосредственно преобразуется в электрический сигнал. Наиболее распространенными в настоящее время являются плоскочелпанельные детекторы непрямого преобразования [17].

В качестве плоскочелпанельных детекторов «сцинтиллятор–полупроводник» чаще всего используются панели на основе аморфного кремния (a-Si) в комбинации со сцинтиллятором из оксисульфида гадолиния Gd_2O_2S , активированного Tb или Eu, либо из иодида цезия CsI, активированного Tl или Na [18]. Перспективным также является использование в качестве сцинтиллятора оксида гадолиния

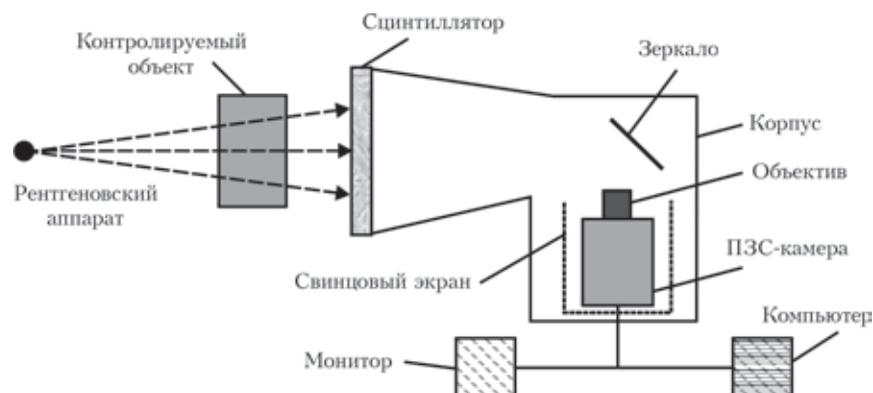


Рис. 5. Схема рентгенотелевизионной системы «сцинтиллятор–ПЗС»



Таблица 5. Параметры многосенсорных рентгеновских детекторов НПО «Телеоптик»

| Тип детектора | Рабочее поле, мм | Количество сенсоров | Сцинтиллятор | Разрешающая способность, пар лин./мм | АЦП, бит | Время получения изображения, с |
|----------------|------------------|---------------------|--|--------------------------------------|----------|--------------------------------|
| Alpha-R-4000 | 380x380 | 48 | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | 4,0 | 14 | <3 |
| IONA-R-01-4000 | 423x320 | 45 | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | 4,0 | 14 | <3 |
| IONA-R-4343 | 432x432 | 48 | CsI | 4,6 | 16 | <5 |
| IONA-R-4343-01 | 428x429 | 88 | Gd ₂ O ₂ S(Tb) (CsI) | 4,6 | 16 | <5 |
| Alpha-R-4600 | 400x400 | 70 | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | 4,3 | 14 | <4 |
| Alpha-M-7000 | 255x185 | 25 | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | 7x7 | 14 | <3 |

Примечание. АЦП – аналого-цифровой преобразователь

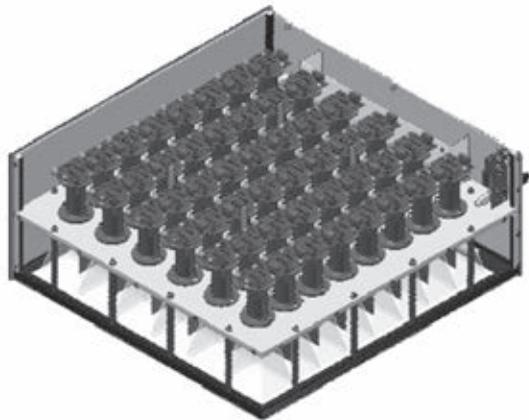


Рис. 6. Конструкция многосенсорного рентгеновского детектора НПО «Телеоптик»

Gd₂O₂S, активированного Eu, который позволяет увеличить пространственную разрешающую способность детектора [19].

Схемы таких плоскочастотных детекторов приведены на рис. 7. Сцинтилляторы преобразуют рентгеновское излучение в видимый свет, который поступает на матрицу фотодиодов из аморфного кремния и конвертируется в электрический заряд. Чувствительность и разрешающая способность детектора с порошковым сцинтиллятором из Gd₂O₂S зависит от толщины и размеров зерна (зернистости) сцинтиллятора. Однако при увеличении его толщины растет рассеяние света и ухудшается разрешающая способность детектора (рис. 7, а).

Для уменьшения рассеяния света в сцинтилляторе и увеличения разрешающей способности детектора применяют сцинтиллятор CsI с монокристаллической игольчатой структурой (рис. 7, б). Монокристаллы CsI игольчатой структуры ориентированы перпендикулярно поверхности сцинтиллятора и направляют свет к фотодиодной матрице как по оптоволокну (т. е. без рассеяния).

Плоскочастотные детекторы непрямого преобразования являются сборками фотодиодов с нанесенным на них сцинтиллятором на активной TFT-матрице (TFT – thin film transistors, или тонкопленочный транзистор). Матрица TFT-транзисторов представляет собой достаточно простую структуру электронных переключателей (типич-

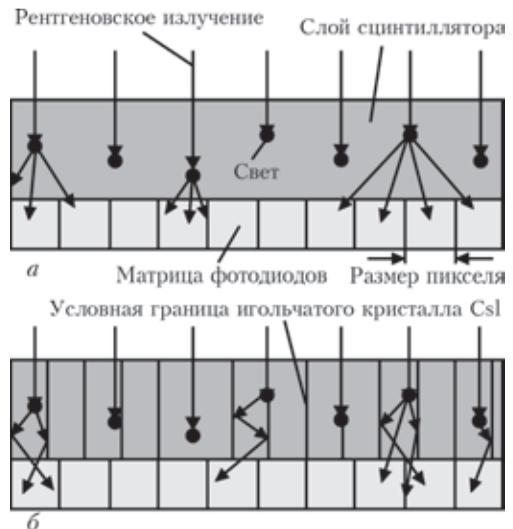


Рис. 7. Схема плоскочастотного детектора непрямого преобразования «сцинтиллятор-полупроводник» на основе аморфного кремния: а – со сцинтиллятором из Gd₂O₂S; б – со сцинтиллятором из CsI

ная схема элемента матрицы TFT-транзисторов показана на рис. 8).

Емкость фотодиода 1 в исходном состоянии заряжена до напряжения U+. При облучении светом она разряжается тем больше, чем больше интенсивность света на фотодиоде. При считывании TFT-транзистор 2 открывается, и емкость снова заряжается через считывающий усилитель до напряжения U+. Величина заряда емкости преобразуется усилителем считывания 3 в напряжение, которое подается на аналого-цифровой преобразователь.

Максимальные размеры плоскочастотных детекторов «сцинтиллятор-полупроводник» составляют 40x40 см, а разрешающая способность – до 10 пар лин./мм, что соответствует размеру пикселя 50 мкм.

Отличительной особенностью аморфного кремния является высокая радиационная стойкость, что позволяет применять такие детекторы при высоких энергиях рентгеновского излучения. Поскольку процесс производства плоскочастотных детекторов на базе аморфных полупроводников и TFT-технологии требует специального технологического оборудования, такие детекторы достаточно дороги.

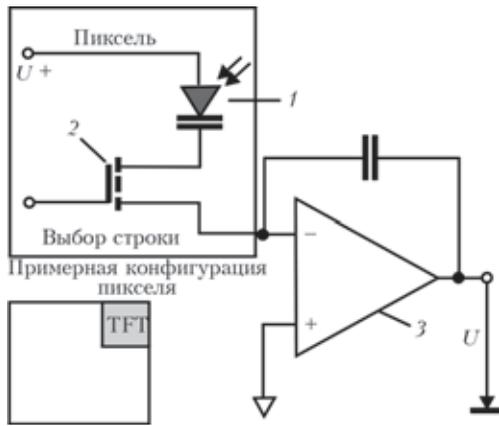


Рис. 8. Схема элемента матрицы TFT-транзисторов: 1 – фотодиод; 2 – тонкопленочный (TFT) транзистор; 3 – считывающий усилитель

В плоскостных детекторах прямого преобразования полупроводниковый слой располагается непосредственно на матрице TFT-транзисторов (рис. 9). В полупроводниковом слое при воздействии рентгеновского излучения внутри полупроводника генерируются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения возникает электронный ток, который усиливается с помощью считывающей электроники и используется для формирования изображения контролируемого объекта.

Наиболее распространенными вариантами детекторов прямого преобразования являются панели на основе аморфного селена (a-Se) и монокристаллического теллурида кадмия (CdTe). В первом случае матрица тонкопленочных транзисторов (TFT) покрывается слоем аморфного селена, что позволяет преобразовать рентгеновское излучение напрямую в цифровой сигнал без использования сцинтилляторов. Вследствие этого достигается качество изображения, характерного для среднезернистой радиографической пленки. Недостатком детекторов на основе аморфного селена является узкий диапазон рабочих температур. Как при работе, так и при хранении температура детектора должна находиться в диапазоне от 5 до 30 °С для того, чтобы избежать кристаллизации селенового слоя.



Рис. 9. Схема регистрации рентгеновского излучения плоскостным детектором прямого преобразования

Плоскостные детекторы прямого преобразования на основе CdTe могут работать в более широком температурном диапазоне при энергиях рентгеновского излучения до 300 кэВ, характеризуясь при этом в несколько раз большей чувствительностью. Кроме того, теллурид кадмия CdTe имеет значительный коэффициент экранирования рентгеновского излучения (более 99 % при толщине 1 мм и энергии 120 кэВ), что обеспечивает высокую радиационную стойкость и большой срок службы таких детекторов [20].

В комплекте с плоскостными детекторами обычно поставляется специальное программное обеспечение для их калибровки и коррекции дефектных пикселей.

На рис. 10 показан внешний вид плоскостных детекторов непрямого преобразования на основе CsI (а) и прямого преобразования на CdTe (б) [12].

Фирма «Hamamatsu» (Япония) является производителем высококачественных плоскостных матричных и линейных детекторов ионизирующего излучения непрямого преобразования, а также сцинтилляционных панелей. В табл. 6 приведены основные параметры сцинтилляционных панелей фирмы «Hamamatsu» [21].

На рис. 11 показано два варианта исполнения плоскостных детекторов фирмы «Hamamatsu».

В конструкции рис. 11, а для переноса изображения с экрана на сенсор используется волоконно-оптическая пластина (fiber optic plate – FOP). Такая пластина позволяет минимизировать потери света и сохранить высокую пространственную разрешающую способность при переносе изображения. В конструкции детектора рис. 11, б сцинтилляционный экран располагается непосредственно на сенсоре (ПЗС-матрице).

Параметры ряда плоскостных детекторов фирмы «Hamamatsu» непрямого преобразования со сцинтиллятором CsI приведены в табл. 7 [22]. Разрешающая способность детекторов составляет от 2,5 до 10 пар лин./мм. Максимальную разрешающую способность (10 пар лин./мм) имеют детекторы с размером пикселя 50 мкм. Для детектора с таким размером пикселя (C9732DK-11) на рис. 12 приведена частотно-контрастная характеристика, позволяющая определить глубину модуляции сигнала от штриховой миры на любой пространственной частоте.

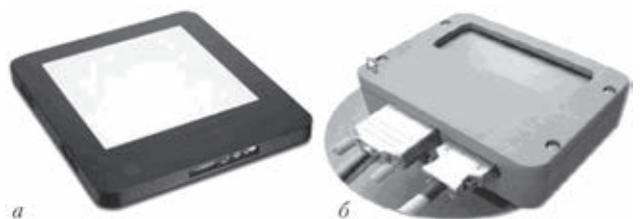


Рис. 10. Плоскостные детекторы непрямого преобразования RID 1640 фирмы «Perkin Elmer» со сцинтиллятором CsI (а) и прямого преобразования DIC 100 фирмы «Ajat» на CdTe (б)



Рис. 11. Варианты исполнения плоскопанельных детекторов фирмы «Hamamatsu»: а – конструкция, в которой изображение экрана на сенсор переносится с помощью волоконно-оптической пластины; б – конструкция с непосредственным расположением сцинтилляционного экрана на сенсоре (ПЗС-матрице)

Таблица 6. Характеристики сцинтилляционных панелей CsI (Tl) фирмы «Hamamatsu»

| | Тип панели | Габаритные размеры, мм | Эффективная площадь, мм | Толщина подложки, мм | Толщина сцинтиллятора, мкм | Относительный световой выход (% от тип.) | ЧКХ (% от тип.) | Тип |
|-----|------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|--|----------------------|-----|
| FOS | J6671 | 30.5×21 | 27×17 | 3 | 150 | 70 | 18 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J6671-01 | | | | 150 | 40 | 33 (10 пар лин. /мм) | BP |
| | J6673 | 50×10 | 47×7 | 3 | 150 | 70 | 18 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J6673-01 | | | | 150 | 40 | 33 (10 пар лин. /мм) | BP |
| | J6675 | 18×18 | 15×15 | 3 | 150 | 70 | 18 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J6675-01 | | | | 150 | 40 | 33 (10 пар лин. /мм) | BP |
| | J6677 | 50×50 | 47×47 | 3 | 150 | 70 | 18 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J6677-01 | | | | 150 | 40 | 33 (10 пар лин. /мм) | BP |
| | J6679 | ∅26,5 | ∅23,5 | 3 | 150 | 70 | 18 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J6679-01 | | | | 150 | 40 | 33 (10 пар лин. /мм) | BP |
| ACS | J8734 | 50×50 | 48×48 | 0,5 | 150 | 125 | 12 (10 пар лин. /мм) | BC |
| | J8734-01 | | | | 150 | 150 | 25 (10 пар лин. /мм) | BP |
| | J8977 | 468×468 | 440×440 | 2 | 600 | 250 | 33 (3 пары лин /мм) | BC |
| ALS | J8978 | 50×50 | 48×48 | 1 | 150 | 70 | 20 (10 пар лин. /мм) | – |
| | J9857 | 468×468 | 440×440 | 1 | 600 | 150 | 35 (3 пары лин /мм) | – |

Примечания. 1. FOS: Fiber Optic Plate with Scintillator (оптоволоконная панель со сцинтиллятором); ACS: Amorphous-Carbon Plate with Scintillator (пластина из аморфного углерода со сцинтиллятором); ALS: Aluminum Plate with Scintillator (алюминиевая пластина со сцинтиллятором). 2. За 100 % принято значения соответствующих параметров экрана Lanex-R. 3. Световой выход и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) измерялись с помощью ПЗС-матрицы с объективом при напряжении на рентгеновской трубке 60 кВ, использовался алюминиевый фильтр толщиной 1 мм. 4. BC: высокий световой выход; BP: высокая разрешающая способность. 5. ПЗС – прибор с зарядовой связью

Калибровка плоскопанельных детекторов, наряду с коррекцией дефектных пикселей, является одной из важнейших операций. Разработаны специальные методики калибровки и вычитания собственных шумов, позволяющие практически полностью скорректировать изображения и получить максимально достижимые отношения сиг-

нал/шум детекторов. Такая процедура улучшает контрастную чувствительность настолько, что позволяет контролировать изменение 1/1000 радиационной толщины контролируемого материала.

Для коррекции дефектных пикселей используется специальный алгоритм. Этот алгоритм усредняет сигналы от соседних пикселей, используя это



Таблица 7. Основные параметры плоскопанельных детекторов фирмы «Hamamatsu»

| Тип детектора | C9252DK-14 | C9728DK-10 | C9732DK-11 | C7943CA-22 |
|-------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| Размер активной области | 249,6 × 124,8 мм | 52,8 × 52,8 мм | 120 × 120 мм | 124,8 × 124,8 мм |
| Размер пикселя | 200 × 200 мкм | 50 × 50 мкм | 50 × 50 мкм | 100 × 100 мкм |
| Частота кадров | 30 кадров / с | 3 кадра / с | 1 кадр / с | 7 кадров / с |
| Разрешающая способность | 2,5 пар лин./мм | 10 пар лин./мм | 10 пар лин./мм | 5 пар лин./мм |
| Динамический диапазон | 3200 | 5600 | 5100 | 4300 |
| Сцинтиллятор | CsI | CsI | CsI | CsI |
| АЦП | 13 бит | 14 бит | 14 бит | 12 бит |

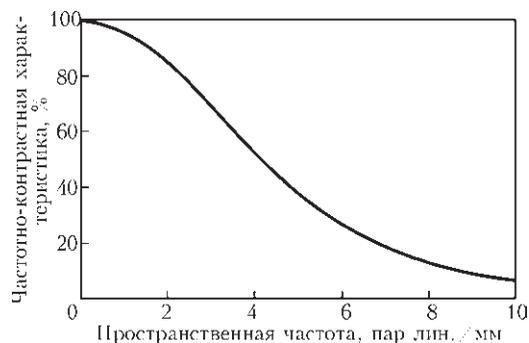


Рис. 12. Частотно-контрастная характеристика плоскопанельного детектора C9732DK-11

среднее значение для дефектных пикселей. Каждый пиксель имеет восемь ближайших соседних пикселей (за исключением тех, которые находятся на краю детектора). Если, по крайней мере, три из них считаются хорошими, тогда возможна операция усреднения их для получения значения дефектного пикселя.

Как показали исследования, плоскопанельные цифровые детекторы позволяют получить существенно более высокое качество изображения, чем пленочная радиография и компьютерная радиография вследствие высокого отношения сигнал/шум, что позволяет снизить предел обнаружения изменения толщины материала до 0,1 % [17].

К недостаткам плоскопанельных цифровых детекторов можно отнести высокую стоимость, критичность к условиям окружающей среды и ограниченную радиационную стойкость.

Системы на основе сканирующих линейных детекторов. Все рассмотренные выше системы не пригодны для контроля крупногабаритных объектов. Контроль таких объектов (багажа, ручной клади, посылок, контейнеров, транспортных средств и т. п.) осуществляется с помощью линейных детекторов, работающих по принципу сканирования [23]. Такие преобразователи представляют собой линейку детекторов либо прямого преобразования (например, типа CdTe, CdZnTe и др.), либо непрямого преобразования рентгеновского излучения (типа сцинтиллятор-кремниевый фотодиод) (рис. 1). В этом случае регистрация рентгеновских квантов происходит за счет их преобразования в сцинтилляторе в видимый свет и последующего детектирования этого света фотодиодом.

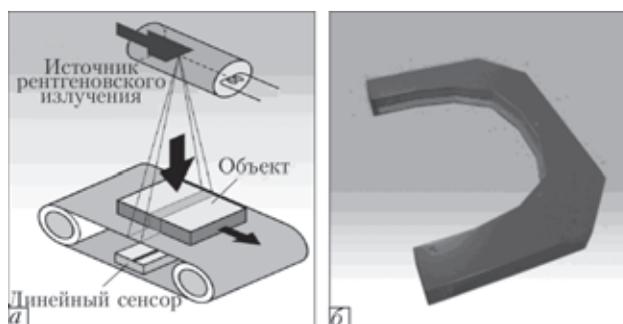


Рис. 13. Схема радиационного контроля линейным детектором на конвейере (а) и внешний вид линейного детектора для контроля качества шин (б)

В таких системах изображение формируется в результате просвечивания узким веерным пучком излучения контролируемого объекта, который движется с постоянной скоростью относительно детектора (рис. 13, а). Размер и пространственная разрешающая способность сканирующей линейки определяются количеством и размером входящих в нее детекторов (каналов). Их может быть 320, 512, 640, 1024, 2048 и больше. Сканирующие системы на основе линейки детекторов имеют ряд преимуществ перед рассмотренными выше системами [24, 25]:

- устраняется влияние неинформативного рассеянного излучения на качество цифрового изображения;
- линейки детекторов могут иметь длину в несколько метров, что позволяет сканировать объекты больших размеров, а размер отдельного детектора до 50 мкм;
- широкий динамический диапазон (больше 7000);
- возможность изготовления линеек, повторяющих специфические формы объекта, например, автомобильных шин (рис. 13, б).

В табл. 8 приведены основные параметры линейных детекторов непрямого преобразования фирмы «Hamamatsu» [26].

На рис. 13 приведена схема радиационного контроля объектов, движущихся на конвейере, с помощью линейного детектора. Объект перемещается с постоянной скоростью относительно источника рентгеновского излучения и линейного детектора, в результате чего объект сканируется узким веерным пучком рентгеновского излучения. Рентгеновское изображение объекта при этом по-



Таблица 8. Параметры различных линейных детекторов фирмы «Hamamatsu»

| Параметр | C9750-05FCN | C9750-10FCN | C9750-10TCN | C9750-20TCN |
|---|---|-------------|-------------|-------------|
| Рекомендованный рабочий энергетический диапазон, кВ | 25...160 | | | |
| Размер пикселя, мм | 0,4 | | 0,2 | |
| Рабочая ширина, мм (пикселей) | 256 (640) | 512 (1280) | 256 (1280) | 512 (2560) |
| Разрешающая способность | 1/640 | 1/1280 | 1/1280 | 1/2560 |
| Скорость сканирования, м/мин | 4...100 | | 2...50 | |
| Разрядность АЦП, бит | 12 | | | |
| Функции коррекции | Аналоговая: коррекция темного кадра. Цифровая: коррекция темного кадра, коррекция чувствительности | | | |
| Рабочий диапазон температур, °С | 0...40 | | | |
| Напряжения питания, В | +5 В, +15 В | | | |
| <i>Примечание.</i> Метод регистрации – сцинтилляционный | | | | |

строчно регистрируется линейным детектором, оцифровывается и передается в компьютер. За счет значительного уменьшения попадающего на детектор рассеянного излучения такие системы позволяют получать рентгеновские изображения высокого качества при малых дозах излучения.

Выводы

Радиационные системы НК с промежуточными носителями информации (пленочная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография) широко применяются в промышленности и обеспечивают высокие относительную чувствительность контроля. Однако такие системы имеют существенные недостатки: невозможность проводить контроль объектов в реальном времени, низкая производительность и высокая стоимость.

Более перспективными являются радиационные системы прямого преобразования на основе полупроводниковых плоскостных детекторов. Такие системы в реальном времени обеспечивают относительную чувствительность контроля и разрешающую способность, соизмеримые и превосходящие пленочную радиографию.

Наиболее перспективными являются плоскостные детекторы и на их основе рентгеновско-телевизионные системы «сцинтиллятор–ПЗС-матрица». Такие системы, имея низкую стоимость, обеспечивают относительную чувствительность контроля и разрешающую способность, соизмеримые с пленочной радиографией, и позволяют проводить контроль объектов в реальном времени при низкой стоимости оборудования. Причем такой контроль осуществляется с использованием оборудования, применяемого у Заказчика при пленочной радиографии. Обнаруженные дефектные зоны по желанию заказчика воспроизводятся на пленку.

1. *Тенденции развития технологий и средств радиационной дефектоскопии* / Н. Р. Кузелев, В. М. Юмашев, Д. И. Антонов и др. // Контроль. Диагностика – 2013. – № 2. – С. 47–55.

2. *Троицкий В. А.* Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–50.

3. *Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов* / Е.Ю. Усачев, В.В. Валиков, Е.Г. Точинский и др. // Контроль. Диагностика – 2014. – № 6. – С. 60–64.

4. *Средства и техника рентгенографии.* Рентгеновские пленки // www.spectroflash.ru/info/articles/287/facilities_x-ray_films.

5. *Lee D. L., Cheung L. K., Jeromin L. S.* Imaging performance of a direct digital radiographic detector using selenium and a thin-film-transistor array // Proc. of the International Symposium: CAR'96 / Ed. by Lemke H.U. – Amsterdam: Elsevier, 1996. – P. 41–46.

6. *Schaefer-Prokop C. M., Prokop M.* Storage phosphor radiography // Eur. Radiol. – 1997. – № 7, Suppl. 3. – P. 58–65.

7. *Майоров А. А.* Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин – что это такое? // В мире неразруш. контроля. – 2004. – № 3 (25). – С. 42–43.

8. *Мозильнер Л. Ю., Маркина Е. Н.* Опыт применения технологии цифровой радиографии в практике строительства и эксплуатации трубопроводов // Там же. – 2009. – № 2 (44). – С. 42–46.

9. *Thales TH 9447 QX (16»)* datasheet // www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/th9447qx_1.pdf.

10. *Siemens HIDEQ 33-4 ISX (13»)* datasheet // w9.siemens.com/cms/oemproducts/Home/Products/Documents/ds_HIDEQ_33-4_ISX_eng_2012-02.pdf.

11. *РЭОП ФИЛИН 16H2048M* // www.tehastor.ru/index.php?page=filin.

12. *Относительная чувствительность рентгеновско-телевизионных систем на основе высокочувствительных ПЗС-камер и рентгеновских монокристаллических экранов* / Н.Г. Белый, С.В. Денбовецкий, А.В. Лещинин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2007. – № 2. – С. 34–40.

13. *Высокочувствительные рентгеновско-телевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений* / В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский и др. // Там же. – 2009. – № 3. – С. 41–46.

14. *Относительная чувствительность рентгеновско-телевизионных систем на основе импульсных рентгеновских аппаратов* / Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский, С. Р. Михайлов и др. // Там же. – 2013. – № 1. – С. 39–44.

15. *Мирошниченко С. И., Невгасимый А. А.* Многосенсорные цифровые рентгеновские приемники // Наука та інновації. – 2014. – № 2 (Т. 10) – С. 40–48.

16. *Цифровые приемники «Альфа» и «Иона»* // www.teleoptic-pra.com.ua/ru/produktiyi/czif-rovyie-priemniki-alfa.html

17. *Майоров А. А.* Цифровые технологии в радиационном контроле // В мире неразруш. контроля. – 2009. – № 3 (45). – С. 5–12.

18. *Nikl M.* Scintillation detectors for X-rays // Meas. Sci. Technol. – 2006. – 17, № 4. – P. 37–54.



19. Chang-Woo Seo, Bo Kyung Cha, Sungchae Jeon. Characterization of indirect X-ray imaging detector based on nanocrystalline gadolinium oxide scintillators for high-resolution imaging application // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2013. – Vol. 699. – P. 129–133.
20. Литвинов А. Высокое качество изображения. Последнее поколение детекторов рентгеновского излучения «SID-A50» // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 6. – С. 10–13.
21. Scintillator Plates // www.hamamatsu.com/jp/en/3010.html.
22. X-ray Flat Panel Sensors // www.hamamatsu.com/jp/en/4011.html.
23. Gingold E., Lee D. Development of a Novel High-Resolution Direct Conversion X-ray Detector // Proc. SPIE. – 2000. – № 3977. – P. 185–193.
24. Недавний О. И., Удод В. А. Современное состояние систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2001. – № 8. – С. 62–82.
25. Оптимизация параметров многоканальных непрерывно сканирующих систем цифровой рентгенографии / В. А. Удод, М. Б. Лебедев, В. А. Клименов и др. // Там же. – 2011. – № 2. – С. 55–62.
26. X-ray Line Scan Camera C9750 // www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SFAS0017E_C9750s.pdf.

The review is devoted to the most widely applied modern systems of radiation nondestructive testing. A classification of radiation nondestructive testing systems is proposed. Traditional systems with intermediate information carriers (film radiography, electroradiography, computer radiography), and promising digital real time systems without intermediate information carriers are considered.

Keywords: nondestructive testing, flash-radiography, digital radiography, X-ray TV system, X-ray electron-optical image intensifier, scintillation screen, CCD-matrix, flat-panel detector

Поступила в редакцию
02.02.2015



РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАНУ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Обследование состояния качества изделий и сооружений радиационными, акустическими, электромагнитными, оптическими, тепловизионными и другими физическими методами

Металлические, полиэтиленовые, композитные, керамические изделия, здания и сооружения (мосты, трубопроводы, котлы, подвижной состав, подъемное и шахтное оборудование) должны периодически обследоваться различными физическими методами на наличие дефектов, старения, износа, трещин усталости, коррозионных поражений и т.п. Для этих целей используется соответствующее оборудование и оригинальные технологии на основе радиационных, акустических, магнитных и других физических полей. При этом измеряют размеры и расположение внутренних дефектов. Эта информация ложится в основу последующих прочностных расчетов, определения остаточного ресурса и рекомендаций по допустимости эксплуатации объекта.

Комплекс диагностических услуг включает:

- визуально-оптические, радиографические, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые, капиллярные, тепловые и другие методы неразрушающего контроля;
- рекомендации по проведению ремонтных работ на основе дефектоскопии;
- консультирование, подготовку, аттестацию и сертификацию персонала в соответствии с международным стандартом ISO 9712;
- оказание помощи в поставке оборудования и организации подразделений неразрушающего контроля;
- оценку свойств и напряженно-деформированного состояния металлоконструкций.

На фото показаны объекты, которые не могут быть приняты в эксплуатацию без проведения контроля качества их сварных соединений физическими методами.



ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
E-mail: office@paton.kiev.ua