

## ДЕТЕКТОРЫ СЦИНТИЛЛЯТОР – ФОТОДИОД ДЛЯ ИНСПЕКЦИОННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНТРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**В. Д. РЫЖИКОВ, Н. Г. СТАРЖИНСКИЙ, Д. Н. КОЗИН, Л. П. ГАЛЬЧИНЕЦКИЙ,  
Е. К. ЛИСЕЦКАЯ, В. М. СВИЦ, А. Д. ОПОЛИН**

В настоящее время актуальным является вопрос разделения в контролируемом объекте материалов, существенно отличающихся по плотности и атомному номеру. В медицине это позволяет провести отдельный диагноз состояния костной структуры и мышечной ткани. В таможенной технике выдвигается требование определения опасных и запрещенных для массового пользователя материалов — взрывчатки, наркотиков — на фоне металлических изделий. Выделение органики на фоне более плотных структур реализуется с использованием двухэнергетических детекторов. Пример построения такого детектора приведен в классическом обзоре [1] и представлен на рис. 1.

Качество материала как высоко- (ВД) так и низкоэнергетического (НД) детектора является определяющим для решения задачи выявления органики на фоне и наряду с присутствием неорганических материалов. Традиционные сцинтилляторы (СЦ) CsI(Tl) и CdWO<sub>4</sub> обеспечивают требуемые параметры ВД, причем выбор сцинтиллятора зависит от используемой энергии рентгеновского источника и требований к инерционности сцинтиллятора. Ситуация с НД сложнее. Детектор должен эффективно регистрировать низкоэнергетическое (20...40 кэВ) излучение, но быть прозрачным для высокоэнергетического (до 80...160 кэВ и более), т. е. иметь низкие плотность, атомный номер, но высокий световыход. Традиционные для регистрации «мягких» излучений пластмассовые сцинтилляторы имеют низкий световыход — единицы процентов от CsI(Tl). Описанные в работе [1] экраны оксисульфида гадолиния и иттрия имеют световыход выше, чем у пластмассы, но существенно ниже, чем у CsI(Tl). Другими их недостатками являются низкая прозрачность и инерционность.

Важнейшей характеристикой рентгеновских цифровых радиографов является пространственное разрешение. Из общих соображений разрешающая способность прибора соизмерима с апертурой детектора. В стандартной ситуации повышение пространственной чувствительности детектора выполняется путем уменьшения шага между детекторами. Технология получения современных фотодиодов (ФД) позволяет получать фотоплощадки размером около 10 мкм. Однако реальная технология сборки дискретных детекторов ограничивает размер одного кристаллического элемента толщиной 0,5...0,6 мм — ниже этого уровня изготовление и сборка элементов затруднительна. В этом случае неизбежно использование одной кристаллической пластинки на фотодиодную матрицу. При этом одной пробле-

мой является взаимное влияние каналов, другой — необходимость использования большого числа усилителей, коммутированных на ряд элементов фотодиодной матрицы, что приводит к громоздкости первично-преобразовательного блока.

Целью данной работы являлась разработка сцинтилляторов, практически не уступающих традиционным CsI(Tl) по световыходу и имеющих меньший уровень послесвечения и относительно низкий атомный номер, создание на их основе НД и ВД, а также детекторов с коммутатором, усилителем и преобразователем в одном корпусе.

В качестве сцинтилляторов исследовались разработанные в Институте монокристаллов и, по нашим данным, не имеющие мировых аналогов сцинтилляторы на основе кристаллов ZnSe(Te).

**Теоретическая часть.** Теоретическая оценка чувствительности НД и ВД после активного фильтра в виде НД, проведена нами на основании выражения [2] для относительной чувствительности инспекционной системы

$$(\delta/d)_v \approx \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{\delta}{V Q_i}}} \frac{\Delta S}{S} \frac{\int_0^{h\nu_{\max}} \alpha(h\nu) e^{-\mu_{eq}(h\nu)d_{eq}} B(h\nu) d(h\nu)}{\int_0^{h\nu_{\max}} G(h\nu) \alpha(h\nu) e^{-\mu_{eq}(h\nu)d_{eq}} \mu(h\nu) d(h\nu)} \quad (1)$$

Здесь  $A_i$  — вклад каждой компоненты высвечивания рентгенолюминесценции СЦ;  $d$  — диаметр проволоочки, см;  $Q_i$  — экспоненциальные компоненты высвечивания рентгенолюминесценции СЦ, с;  $d, d_{eq}$  — соответственно толщина объекта фона и фона с всевозможными фильтрами, см;  $V$  — скорость движения объекта, см/с;  $\alpha(h\nu)$  — дозовый вклад данной энергии в спектре рентгеновского излучения;  $\mu_{eq}(h\nu), \mu(h\nu)$  — линейные коэффициен-

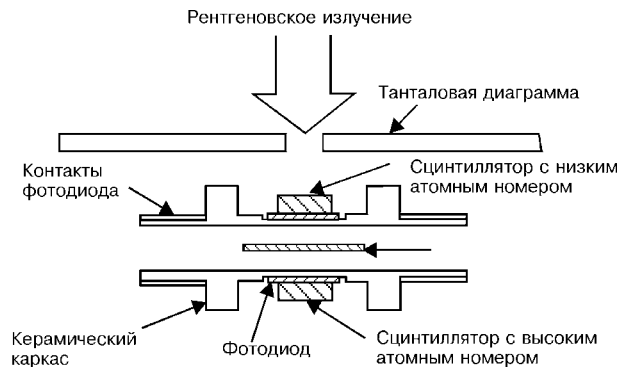


Рис. 1. Детекторная система двухэнергетического радиографа.

ты ослабления объекта со всевозможными фильтрами и фонового объекта;  $B(h\nu)$  — фактор поглощения рассеянного излучения объекта;  $\Delta S/S$  — пороговый контраст системы;  $G(h\nu)$  — функция контрастности. Последнюю можно оценить как:

$$G(h\nu) \sim \frac{\Delta C}{\Delta P} = 0,6875 \cdot 10^5 \frac{1 - e^{\mu_{sc}(h\nu)h_{sc}}}{\gamma_a(h\nu)} \frac{\gamma_{sc}(h\nu)}{\mu_{sc}(h\nu)} \eta_{sc} R_{light} K_{sc} \eta_{PD}, \quad (2)$$

где  $\Delta C/\Delta P$  — радиационное приращение сигнала детектора;  $\mu_{sc}(h\nu)$  — линейный коэффициент ослабления СЦ,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\gamma_{sc}(h\nu)\gamma_a(h\nu)$  — линейные коэффициенты электронного преобразования СЦ и воздуха,  $\text{см}^{-1}$ ;  $R_{light}$  — коэффициент светособирания в СЦ на ФД;  $K_{sc}$  — коэффициент спектрального согласования спектра излучения СЦ и чувствительности ФД;  $\eta_{sc}$  — конверсионная эффективность СЦ;  $\eta_{PD}$  — эффективность преобразования ФД.

Пороговый контраст системы  $\Delta S/S$  определяется шумами детекторов и разрядностью АЦП, поскольку цветное и тоновое разделение сигналов, получаемое на экране монитора, имеет гораздо больший диапазон при восприятии оптического разделения глазом человека.

**Расчетные и практические результаты.** 1. Детекторы для двухэнергетической интроскопической системы. Для расчета была использована стандартная геометрия НД и ВД на основе ZnSe(Te) и CsI(Tl), выпускаемых нами для инспекционных систем таможенного контроля (табл. 1) и характе-

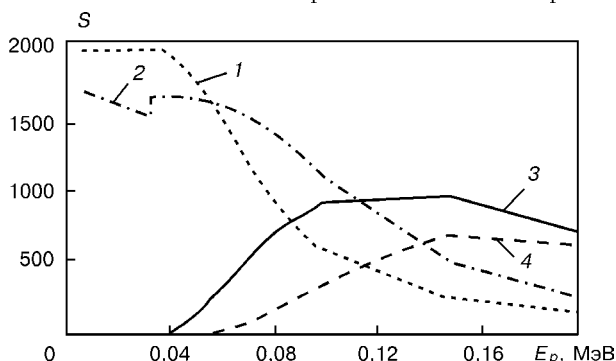


Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности детекторов в двухэнергетической системе при различных комбинациях сцинтилляторов: 1 — НД (ZnSe(Te)); 2 — НД (CsI(Tl)); 3 — ВД (CsI(Tl) — НД (ZnSe(Te))); 4 — ВД (CsI(Tl) — НД (CsI(Tl))).

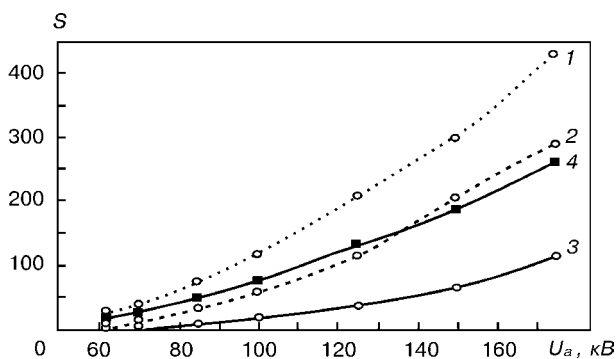


Рис. 3. Выходной сигнал ВД с активным фильтром НД с различными комбинациями СЦ для разных напряжений на трубке: 1 — ВД (CsI(Tl)); 2 — ВД (CsI(Tl)) — НД (ZnSe(Te)); 3 — ВД (CsI(Tl) — НД (CsI(Tl))); 4 — ВД (ZnSe(Te)).

Таблица 1. Геометрия НД и ВД

Параметр	Значение параметра
Количество каналов	16
Общая длина, мм	27,2
Размеры фоточувствительной площадки ФД, мм	1,4×4
Зазор между фотоплощадками, мм	0,25
Шаг детектора, мм	1,65
Размеры кристаллического элемента:	
ВД	1,4×4×4
НД	1,4×4×0,7

Таблица 2. Характеристики сцинтилляторов для системы сцинтиллятор — фотодиод

Параметр	ZnSe(Te)	CsI(Tl)
Конверсионная эффективность	19,4	15
Время высвечивания $\tau$ , мкс	5...7	1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,4	4,5
Эффективный атомный номер, $Z_{эфф}$	33	52
Максимум высвечивания $\lambda_m$ при 300 К, нм	610	570
Послесвечение (через 10 мс), %	0,05	1...8
Коэффициент поглощения $\lambda_m$ , $\text{см}^{-1}$	0,1...0,3	0,05
Коэффициент преломления для $\lambda_m$	2,4	1,79
Предел радиационной стойкости, Рад	10 <sup>8</sup>	10 <sup>4</sup>
Коэффициент спектрального согласования Si-ФД с СЦ $K_{SC}$	0,49	0,34
Чувствительность, нА·мин/(Р·см <sup>2</sup> ):		
НД	60...90	60...90
ВД	60...100	100...130

ристики сцинтилляторов (табл. 2) [3]. Результаты расчета чувствительности НД на основе CsI(Tl) и ZnSe(Te), а также комбинации этих материалов для ВД и НД систем, где в качестве активного фильтра использован один из этих материалов, приведены на рис. 2. Выходной сигнал ВД с активным фильтром НД в различных комбинациях для разных напряжений на трубке представлен на рис. 3.

Из расчетных данных следует, что НД на основе ZnSe(Te) до энергии 50 кэВ по чувствительности превосходят CsI(Tl), а ВД на основе CsI(Tl) на 30...80 % превосходят ZnSe(Te) в диапазоне 80...200 кэВ. Эксперимент показал, что чувствительность ВД на основе CsI(Tl) в указанном диапазоне около 100 нА·мин/(Р·см<sup>2</sup>), а у ZnSe(Te) 60...80 нА·мин/(Р·см<sup>2</sup>). Для НД картина обратная, что коррелирует с расчетными данными.

Инерционность кристаллов CsI(Te) ограничивает его применение в быстродействующих интроскопических системах даже в ВД. Согласно выражению (1) уже при скорости движения объекта  $V = 100 \text{ см/с}$  для проволоки диаметром  $d = 0,1 \text{ мм}$  относительная чувствительность системы падает в 1,5 раза для детекторов с кристаллами CsI(Te) и в 1,2 раза с ZnSe(Te). А при скоростях объекта  $V > 200 \text{ см/с}$  ВД на ZnSe(Te) превосходят ВД на CsI(Te).

2. Увеличение пространственного разрешения. Увеличение пространственного разрешения рентгеновских цифровых радиографов возможно двумя способами:

1). Использование нестандартных условий эксперимента с применением законов геометрической оптики. Нами достигнуто достаточно высокое — десятки мкм — разрешение даже при использовании стандартного детектора с апертурой 1,65 мм (рис. 4).

**Таблица 3. Характеристики таможенной инспекционной рентгеновской системы «Полискан-4»**

Параметр	Значение параметра
Проникающая способность по стали	до 25 мм
Контрастная чувствительность	до 20 градаций серого цвета
Обнаруживающая способность	медная проволочка 0,1 мм
Число каналов системы детектирования	864
Скорость транспортера	0,2 м/сек
Размер тоннеля	700×950 мм
Масса контролируемого объекта	100 кг
Анодное напряжение излучателя	140 кВ
Анодный ток излучателя	1 мА
Уровень рентгеновского излучения на внешней поверхности аппарата	до 0,1 мР/ч
Размер контролируемого объекта	до 3500×1650×1550 мм

2). Уменьшение шага детектора. В рамках проекта, финансируемого INTAS-94-3341, нами изготовлены и исследованы детекторы СЦ-ФД с толщиной СЦ 0,5 мм и шагом 0,8 мм на базе 32-хканального ФД с коммутатором, усилителем и преобразователем на одной подложке. Вследствие этого на весь 32-канальный модуль необходим только один усилитель. Создана экспериментальная установка и получено контрольное изображение для 128- и 256-канальной сборки из этих элементов (рис. 5).

Чувствительность этих детекторов составляет 1740 нА·мин/(Р·см<sup>2</sup>) для времени накопления 10 мс. Установка позволяет изменять время накопления, при этом пропорционально повышается чувствительность детектора.

**Обсуждение. 1.** Высокая квантовая эффективность  $\eta = 0,194$  у ZnSe(Te), лучшее чем у CsI(Tl), спектральное согласование с Si-фотодиодом, присутствие К-скачка у CsI(Tl) при  $E_p \approx 33$  кэВ приводят к превосходству по чувствительности НД на ZnSe(Te) до  $E_p = 50$  кэВ.

2. Малый эффективный атомный номер ZnSe(Te)  $Z_{эфф} = 33$ , обеспечивающий при толщине сцинтиллятора  $d_{сц} = 0,6$  мм хорошую проникаемость для энергии больше  $E_p = 50$  кэВ, позволяет получить большую, чем при использовании CsI(Tl), интенсивность ионизирующего излучения в нужном спектральном диапазоне на ВД.

3. Низкая по сравнению с ВД на CsI(Tl) чувствительность ВД на ZnSe(Te) связана с худшей прозрачностью к собственному излучению селенида цинка (0,1 см<sup>-1</sup>), что снижает чувствительность при увеличении толщины СЦ более чем на 1...2 мм.

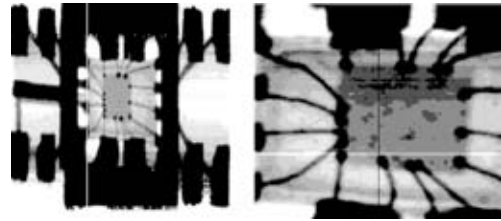


Рис. 4. Внутренняя разводка от полупроводникового кристалла в микросхеме серии КМ.

4. При использовании высокой скорости перемещения объекта  $V > 200$  см/с наиболее эффективная система НД (ZnSe(Te)) – ВД (CsI(Tl)) будет уступать по чувствительности системе НД (ZnSe(Te)) – ВД (ZnSe(Te)) вследствие большой инерционности CsI(Tl). Наличие у CsI(Tl) составляющих с большими временами высвечивания  $\tau \approx 50$  мс при времени высвечивания основной части энергии за  $t_{высв} < 1$  мкс (у ZnSe(Te)  $t_{высв} = 5...7$  мкс), сравнимых с временем перемещения объекта, приводит к уменьшению чувствительности радиографической системы по толщине объекта.

5. На системе НД (ZnSe(Te)) – ВД (ZnSe(Te)) была построена таможенная инспекционная рентгеновская система с характеристиками, приведенными в табл. 3. Реальное изображение с использованием НД – ВД (СЦ ZnSe(Te)), позволяющее разделять органику от неорганики [4], представлено на рис. 6.

6. Высокая чувствительность детекторов с внутренней коммутацией и усилением, а также полученное на них пространственное разрешение 1,5 пар. линий/мм позволяют утверждать о возможности создания детекторов с шагом менее 0,8 мм.

**ВЫВОДЫ**

1. По динамическим характеристикам радиационной стойкости ( $10^7...10^8$  Рад), энергетическому спектру, чувствительности и проникаемости для рентгеновского излучения лучшим СЦ для НД является ZnSe(Te).

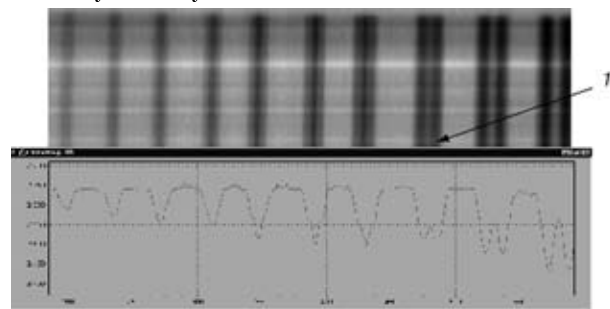


Рис. 5. Контрольное изображение по эталону (толщина проволочки  $d = 0,8$  мм).

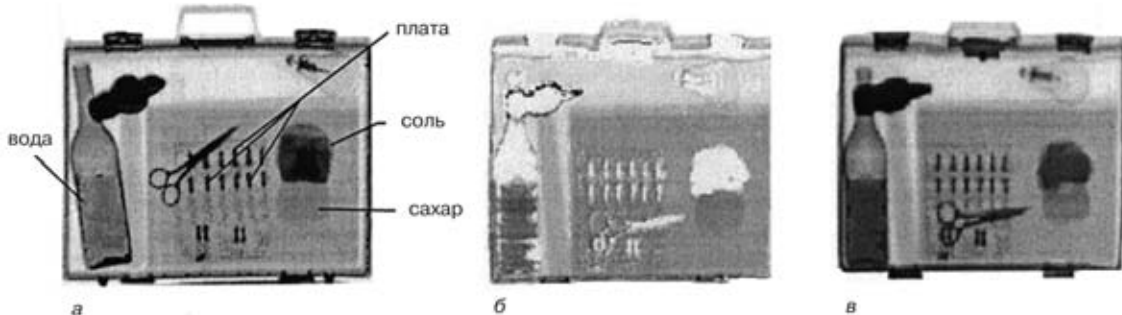


Рис. 6. Изображение объекта на двухэнергетическом интроскопе: а – теневая общая картина объекта; б – с вычленением неорганики; в – с вычленением органики.

2. Наиболее чувствительная двухэнергетическая инспекционная система представляет из себя НД (ZnSe(Te)) – ВД (CsI(Tl)). Такая система имеет контрастную чувствительность менее 1% при проникающей способности по стали, равной 25 мм для  $U_a = 140$  кВ, и способна разделять органику от неорганики.

3. Дальнейшее развитие радиографических систем с высоким пространственным разрешением планируется путем использования фотодиодных структур с усилителями и коммутатором в одном корпусе с шагом менее 800 мкм.

НТЦ РП НТК «Ин-т монокристаллов» НАН Украины,  
ПО «Коммунар», НТ СКБ «Полисвит»,  
Харьков

1. *Harrison's R. M.* Digital radiography – a review of detector design // NIM, 1991, A310. – P. 24–34.
2. *Добромыслов В. А., Румянцев С. В.* Радиационная интроскопия. – М.: Атомиздат, 1972.
3. *Кристаллы* сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе / Под ред. В.Д. Рыжикова. – Киев: Наук. думка, 1998.
4. *Scintillator-photodiode* detecting systems for two-level X-ray inspection systems / V. D. Ryzhikov, N. G. Starzhinskiy, L. P. Gal'chinetskii, et al. // Proc. of 15th World Conf. on non-destructive testing, Roma, 15–21 October 2000. – P. 466.

Поступила в редакцию  
02.02.2001

УДК 621.129.16

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

**В. С. ГИРЕНКО, С. Е. СЕМЕНОВ, Л. В. ГОНЧАРЕНКО**

Одним из существенных аспектов технической диагностики и оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов является определение возможных изменений служебных характеристик металла в процессе длительной эксплуатации.

В последние годы появилось много работ, в которых рассмотрено ухудшение свойств металла трубопроводов в течение времени как следствие процессов старения. Ограничиваясь только упоминанием об этом<sup>1</sup>, заметим, что многообразие явлений старения требует четкой интерпретации сущности протекающих процессов в материалах. Часто употребляемый термин «старение» зачастую не полностью отражает реальную картину. По сути в ряде случаев речь идет не столько о влиянии фактора времени, сколько о реакции трубного металла на испытываемые им воздействия. При широком понимании термина "старение" изменение служебных характеристик металла и сварных соединений трубопроводов может быть связано с различными физико-химическими процессами. В данном случае рассматриваются возможные последствия деформационного старения.

Основное затруднение, которое возникает при попытках непосредственной оценки соответствующих эффектов, обычно обусловлено отсутствием достоверных образцов-свидетелей. Использование результатов тех или иных не вполне целенаправленных побочных испытаний, выполненных ранее, не обеспечивает корректность выводов. Это обусловлено значительным различием свойств, характерным для трубных сталей, являющихся продукцией массового производства. В этом может заключаться одна из причин противоречий между результатами различных исследований [1–4]. Возникающие трудности усугубляются тем, что максимально

возможные изменения свойств в процессе деформационного старения после длительной эксплуатации должны определяться не столько временем, сколько величиной предварительной пластической деформации. При этом наибольшие деформации носят локальный характер, что дополнительно осложняет непосредственную оценку. Исключая из рассмотрения экстремальные случаи, связанные с грубыми нарушениями условий монтажа трубопроводов, подвижками грунта и т. п., целесообразно отметить следующее.

Трубный передел сопровождается холодным деформированием металла, что особенно характерно для производства сварных труб. В современной нормативной документации на трубы для магистральных нефте- и газопроводов нормируется только предельно допустимая величина экспандирования труб (не более 1,2 %). Однако следует иметь в виду, что деформационные процессы в трубном производстве не ограничиваются операцией экспандирования. Они могут быть весьма разнообразными и характеризуются одно- и многократным приложением сосредоточенных либо распределенных силовых нагрузок, различной степенью деформирования по длине и толщине стенки заготовки. Иными словами, при трубном переделе нельзя полностью исключить возможность возникновения повышенных местных пластических деформаций.

Как известно, форма трубной заготовки заметно изменяется в ходе технологического процесса. Это обусловлено многократным деформированием в различных силовых агрегатах (формовочных, сборочных, сварочных и др.), сварочными операциями, а также упругопластической релаксацией внутренних напряжений в периоды, когда частично либо окончательно сформованная трубная заготовка

<sup>1</sup>Обсуждение опубликованных работ, посвященных проблеме старения трубного металла, содержится в [1].