
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 539.1.05
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-56-68

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МЕТОДА И КОДИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

А. В. ВАСИЛЬЕВА, В. А. РЫЖОВА, А. С. ВАСИЛЬЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: avasileva@corp.ifmo.ru*

Рассматриваются теоретические аспекты способа формирования гамма-изображения, который базируется на сцинтилляционном методе с применением твердотельного кремниевого фотоэлектронного умножителя и кодирующей апертуры. Показаны физические процессы, происходящие в сцинтилляторе при взаимодействии с ионизирующим излучением и приводящие к генерации видимого излучения. Эффективные сечения фотоэффекта, комптоновского рассеяния и генерации электрон-позитронных пар вычислены в зависимости от энергии гамма-кванта. Показаны параметры некоторых сцинтилляционных кристаллов, различающихся физическими свойствами и эффективностью ослабления гамма-излучения. Рассмотрен принцип работы кодирующей апертуры, предназначенной для формирования гамма-изображения, и приведены способы реализации ее различных конфигураций. Предложена структурная схема системы визуализации гамма-излучения, обеспечивающая высокую наглядность и эффективность мониторинга гамма-излучения.

Ключевые слова: *гамма-визуализация, Si-ФЭУ, сцинтиллятор, поглощение гамма-излучения, кодирующая апертура*

Введение. Гамма-излучение представляет опасность для здоровья человека, особенно в случае высокой дозы и продолжительности облучения. В связи с этим существует множество методов детектирования гамма-излучения, которые постоянно развиваются и совершенствуются. Так, на сегодняшний день перспективным направлением в области детектирования гамма-излучения является его визуализация. Для реализации этого метода, как правило, берется за основу сцинтилляционный способ детектирования гамма-квантов с использованием неорганических кристаллов-сцинтилляторов [1]; менее очевидным, но также применяемым подходом является использование радиационных счетчиков [2]. В существующих разработках, основанных на сцинтилляционном методе, в качестве изображающих детекторов используются матричные ПЗС и КМОП-сенсоры [3, 4] или трекинговые детекторы Medipix [5, 6]. Возможности применения такого перспективного детектора, как кремниевый фотоэлектронный умножитель (Si-ФЭУ), для решения поставленной задачи пока не изучены, несмотря на то, что этот детектор активно применяется для задачи обнаружения и идентификации радионуклидов в составе гамма-спектрометров [7, 8].

Таким образом, актуальным представляется осуществление визуализации гамма-излучения сцинтилляционным методом с использованием Si-ФЭУ. Основная цель настоящей статьи —

обоснование структурной схемы системы визуализации гамма-излучения на основе Si-ФЭУ. Для достижения этой цели необходимо проанализировать теоретические аспекты генерации сцинтиллятором излучения видимого спектрального диапазона под воздействием ионизирующего излучения, а также провести исследование метода формирования и восстановления изображений, полученных с помощью кодирующей апертуры.

Генерация видимого излучения. Действие сцинтилляционных детекторов основано на ионизирующем свойстве гамма-излучения. В сцинтилляторе поглощение гамма-кванта или другой нейтральной частицы высокой энергии (например, рентгеновского фотона или нейтрона) приводит к образованию заряженной частицы (иона, быстрого электрона). В результате такого взаимодействия происходит возбуждение кристалла, при этом вследствие сопутствующих процессов рассеяния на электронах число возбуждений до момента поглощения ионизирующей частицы может достигать 10^5 и более [9].

Таким образом, процесс сцинтилляции при взаимодействии сцинтиллятора с гамма-квантом, включает три этапа (рис. 1) [10].

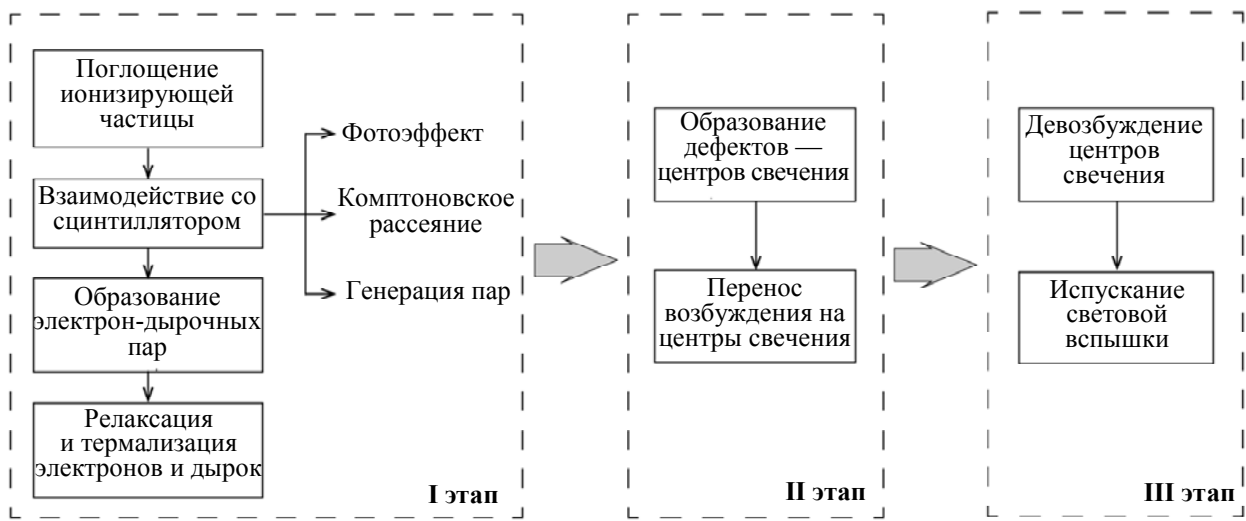


Рис. 1

В зависимости от вида ионизирующего излучения взаимодействие со сцинтиллятором в рамках первого этапа может быть различным. В случае гамма-излучения на этом этапе происходят три процесса: фотоэффект, комптоновское рассеяние и генерация пар. Эти эффекты приводят к частичному или полному поглощению гамма-кванта. Для дальнейшего описания этих процессов используется понятие сечения, которое имеет смысл вероятности того или иного взаимодействия и размерность площади (см²).

В результате фотоэффекта фотон передает электронам вещества часть своей энергии, которая определяется первоначальной энергией. Сечение фотоэффекта существенно зависит от среды, с атомами которой взаимодействуют гамма-кванты. Полное сечение фотоэффекта определяется по следующим формулам [11]:

$$\sigma_{\phi} = \frac{5}{4} \cdot 1,09 \cdot 10^{-16} \cdot Z^5 \left(\frac{13,5}{E_{\gamma}} \right)^{3,5} \quad \text{для } E_{\gamma} < E_0;$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{5}{4} \cdot 1,34 \cdot 10^{-33} \cdot Z^5 \left(\frac{1}{E_{\gamma}} \right)^1 \quad \text{для } E_{\gamma} > E_0,$$

где E_{γ} — энергия гамма-кванта; $E_0 = m_e c^2$ — энергия свободного электрона, равная 0,511 МэВ; Z — атомный номер поглощающего вещества.

На рис. 2 показаны зависимости эффективного сечения фотоэффекта от энергии гамма-квантов для некоторых сцинтилляционных кристаллов, а также для алюминия и свинца. Следует отметить, что график отражает только фотоэффект, наблюдаемый на электронах K-оболочки, поскольку именно этот случай наиболее вероятен (около 80 %).

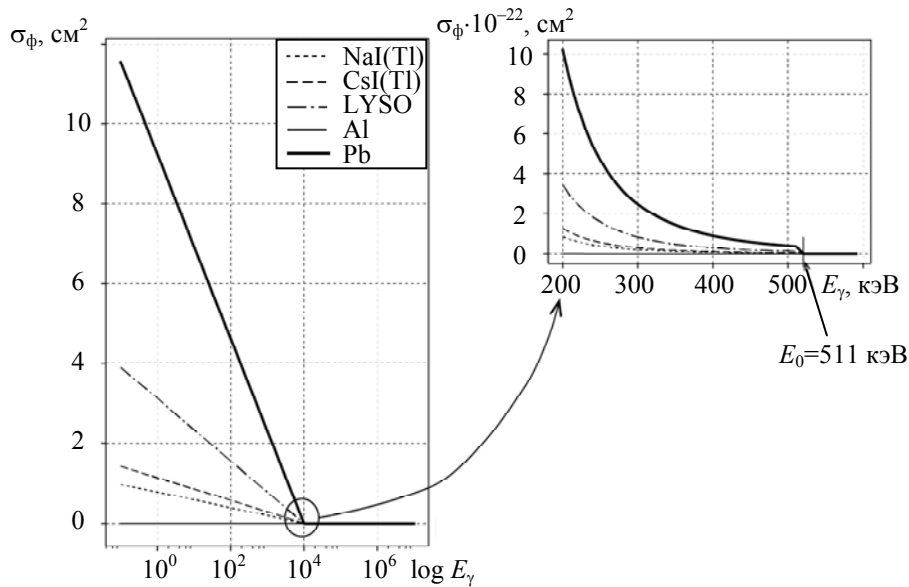


Рис. 2

При расчете полного сечения фотоэффекта в сцинтилляционных кристаллах вместо зарядового числа Z применялся эффективный атомный номер $Z_{\text{эф}}$, который рассчитывается по формуле [12]

$$Z_{\text{эф}} = \sqrt[4]{\sum_i w_i Z_i^4},$$

где w_i — массовая доля i -го вещества с атомным номером Z_i .

Как видно из графика (см. рис. 2), вероятность фотоэффекта пропорциональна энергии гамма-кванта, поэтому по количеству образованного в результате фотоэффекта заряда можно судить о его первоначальной энергии. В связи с этим фотоэффект является наиболее информативным процессом взаимодействия гамма-излучения с веществом. Поскольку $\sigma_{\text{ф}}$ сильно зависит от Z ($Z_{\text{эф}}$), сечение фотоэффекта будет больше для более „тяжелых“ сцинтилляционных материалов, применение которых для регистрации гамма-излучения является целесообразным. Согласно представленным графикам, наилучшим показателем сечения фотоэффекта обладает кристалл LYSO, а наихудшим — NaI(Tl).

Комптоновское рассеяние является доминирующим процессом при взаимодействии вещества с гамма-квантами с энергией E_{γ} от 100 кэВ до 2-3 МэВ [12]. При комптоновском рассеянии изменяется частота фотона и его траектория отклоняется на угол θ от первоначального направления. Часть энергии и импульса фотона передается свободным электронам вещества (это явление называется комптоновским сдвигом). Энергия фотона после такого взаимодействия определяется формулой [11]

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)},$$

где θ — угол рассеяния, $\alpha = E_0/E_{\gamma}$.

Таким образом, часть энергии, передаваемая электрону, зависит от угла разлета фотона и электрона после взаимодействия. Угловое распределение рассеянных фотонов, в свою очередь, определяется их первоначальной энергией. Дифференциальное сечение $\frac{\sigma_k}{d\Omega}$ комптоновского рассеяния излучения на единицу телесного угла описывается формулой Клейна — Нишины [13]:

$$\frac{\sigma_k}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \left(1 + \cos^2 \theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right), \quad (1)$$

где $r_e = 2,8179 \cdot 10^{-15}$ м — классический радиус электрона.

Нормированный график дифференциального сечения, рассчитанного по формуле Клейна — Нишины, для числа фотонов, рассеянных в телесном угле $d\Omega$ в направлении θ , при различных энергиях гамма-кванта показан на рис. 3.

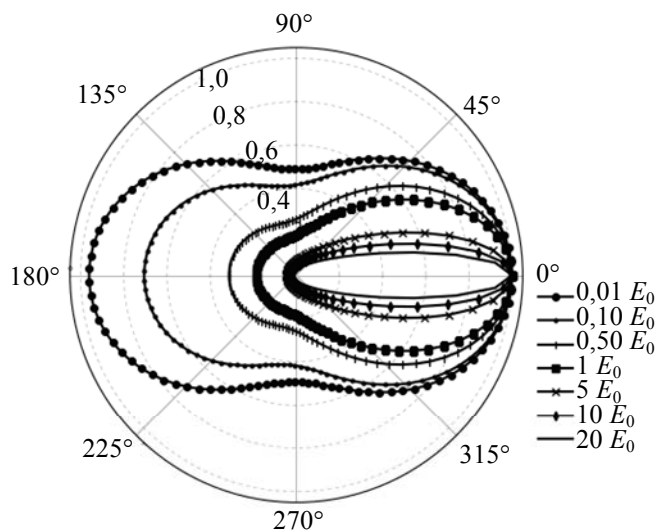


Рис. 3

Анализ графика показывает, что форма углового распределения комптоновского рассеяния изменяется с изменением энергии фотонов. Чем меньше значение энергии гамма-квантов, тем более симметрично распределение рассеянных фотонов, причем рассеяние в направлении „назад“ и рассеяние в направлении „вперед“ равновероятны. При малых значениях энергии также высока вероятность рассеяния фотонов на большие углы. При увеличении энергии гамма-квантов все меньше фотонов рассеиваются в направлении „назад“, кроме того, преобладает рассеяние на малые углы.

Выражение для полного сечения комптоновского рассеяния можно получить интегрированием формулы (1) по $d\Omega$ [11]:

$$\sigma_k = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right\}. \quad (2)$$

Видно, что зависимость сечения комптоновского рассеяния от энергии фотонов менее очевидная, чем аналогичная зависимость для фотоэффекта. Поэтому зафиксированная детектором энергия гамма-кванта после комптоновского рассеяния не несет информации о его первоначальной энергии.

Если энергия гамма-квантов превышает 1,022 МэВ ($2E_0$), существует вероятность образования электрон-позитронных пар. В результате такого взаимодействия гамма-квант

поглощается и рождаются электрон и позитрон [12]. После этого электрон и позитрон аннигилируют, причем характер аннигиляции определяется ориентацией их спинов. Зависимость сечения генерации пар от энергии гамма-квантов имеет весьма сложный вид. На практике часто пользуются приближенной формулой, которая справедлива для широкого диапазона энергий [11]:

$$\sigma_{\pi} = 4Z^2 \frac{r_e^2}{137} \left\{ \frac{7}{9} \left[\ln \left(\frac{2E_{\gamma}}{E_0} \right) - f(Z) \right] - \frac{109}{54} \right\}.$$

В этой формуле $f(Z)$ — кулоновская поправка, которая зависит от атомного номера вещества:

$$f(Z) = q^2 \left[(1+q^2)^{-1} + 0,2026 - 0,0369q^2 + 0,0083a^4 - 0,002a^6 \right],$$

где $q = Z/137$.

На рис. 4 показаны сечения генерации пар для различных сцинтилляторов. Видно, что при небольших значениях E_{γ} вероятность генерации электрон-позитронных пар мала. В отличие от комптоновского рассеяния и фотоэффекта, этот процесс становится доминирующим при высоких энергиях фотонов.

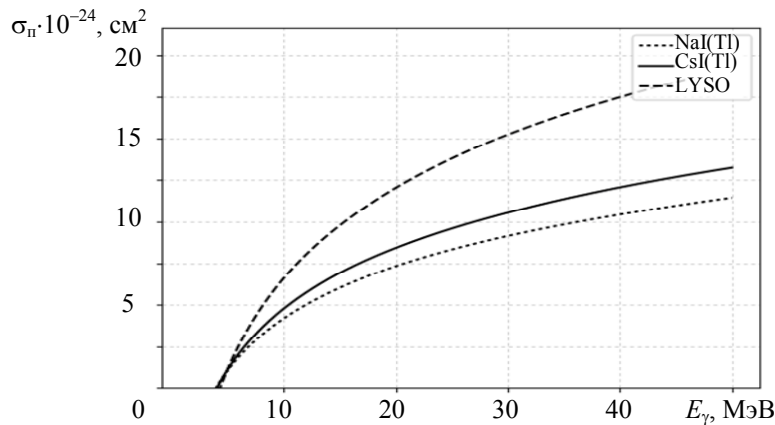


Рис. 4

Таким образом, суммарное ослабление гамма-излучения в веществе сцинтиллятора обуславливается тремя процессами: фотоэффектом, комптон-эффектом и образованием электрон-позитронных пар. Эффективное сечение взаимодействия фотонов складывается из трех составляющих:

$$\sigma = \sigma_{\phi} + Z\sigma_{\kappa} + \sigma_{\pi}.$$

С помощью этой величины можно определить линейный коэффициент ослабления гамма-излучения по формуле

$$\tau = \sigma \rho \frac{N_A}{M},$$

где ρ — плотность вещества сцинтиллятора, г/см³; $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ — число Авогадро; M — молярная масса вещества сцинтиллятора, г/моль.

Для рассматриваемых сцинтилляторов зависимость коэффициента τ от энергии гамма-излучения имеет вид, показанный на рис. 5.

Физические процессы, происходящие в сцинтилляторе при взаимодействии с ионизирующим излучением, определяют его свойства, имеющие значение при детектировании этого излучения. Наиболее часто применяемые сцинтилляторы и их свойства [12, 14] представлены в таблице.

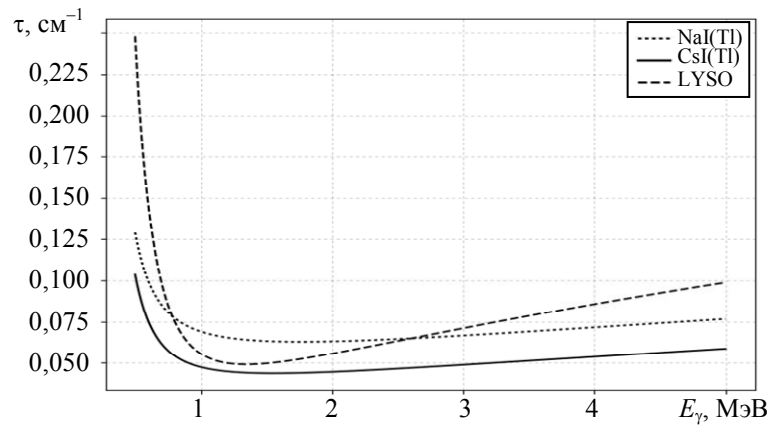


Рис. 5

Кристалл	Время затухания, нс	Световой выход, фотонов/МэВ	Энергетическое разрешение, %	Радиационная стойкость, рад	Плотность, г/см ³	Стоксов сдвиг, эВ	Гигроскопичность
NaI(Tl)	250	40000	7	10^3	3,67	1,35	Да
CsI(Tl)	1000	55700	6,2	$2 \cdot 10^5$	4,51	1,93	Да
CsI(Na)	630	41000	7,4	$1 \cdot 10^5$	4,51	2,07	Да
LYSO	40	33000	7,9	10^6	7,4	0,45	Нет

Указанные в таблице характеристики напрямую определяют выбор сцинтиллятора в системах детектирования, в том числе визуализации, гамма-излучения. Поэтому рассмотрим критерии, которыми необходимо руководствоваться при выборе.

1. Время затухания должно быть как можно меньшим для эффективного детектирования гамма-квантов с высокой частотой.

2. Световой выход определяет число фотонов, испущенных сцинтиллятором, на один поглощенный мегаэлектрон-вольт энергии. Следует выбирать материалы с наибольшим световым выходом.

3. Энергетическое разрешение сцинтиллятора отражает его способность „различить“ энергии гамма-квантов, отличающиеся на величину $\Delta E = |E_1 - E_2|$. Очевидно, чем меньше эта величина, тем более эффективно происходит детектирование и идентификация гамма-квантов.

4. Радиационная стойкость означает сохранение сцинтилляционных свойств кристалла, в частности светового выхода, под воздействием ионизирующего излучения и определяется накопленной дозой, вызывающей ухудшение этих свойств. При деградации сцинтиллятора под воздействием ионизирующего излучения могут возникать следующие эффекты:

- образование центров окраски, что приводит к уменьшению прозрачности кристалла и снижению светового выхода;
- изменение характеристик сцинтилляции и возрастание вероятности безызлучательных переходов в центрах свечения;
- увеличение послесвечения;
- появление собственной радиоактивности.

5. Плотность сцинтиллятора также оказывает влияние на эффективность детектирования гамма-излучения. Использование „тяжелых“ материалов более целесообразно, поскольку

в таких веществах гамма-квант более эффективно теряет энергию и может быть зарегистрировано больше гамма-квантов.

6. Стоксов сдвиг зависит от степени перекрытия спектров поглощения и сцинтилляции. Он определяет вклад явления реабсорбции, которое приводит к тому, что свет от сцинтилляционной вспышки перепоглощается, в результате чего уменьшается световой выход. Таким образом, для эффективной регистрации гамма-излучения следует выбирать сцинтилляторы с максимальным стоксовым сдвигом, который равен разности длин волн максимумов спектров поглощения и сцинтилляции.

7. Гигроскопичность, т.е. способность поглощать водяные пары из воздуха, свойственна многим сцинтилляционным материалам и приводит к их деградации или полному разрушению. Сцинтилляторы, обладающие этим свойством, сразу после выращивания должны быть упакованы в герметичные контейнеры; кроме того, требуются специальные условия, которые необходимо соблюдать при их выращивании.

При специфических применениях сцинтилляторов, таких как гамма-картаж, предъявляются также особые требования по температурной стабильности светового выхода.

Кроме того, для эффективного детектирования гамма-излучения важно учитывать пиковую длину волны спектра сцинтилляции, которая должна быть согласована с чувствительностью используемого детектора.

Формирование гамма-изображения. Для создания гамма-изображения поток гамма-квантов необходимо сфокусировать. Поскольку к гамма-излучению относят электромагнитное излучение, длина волны которого значительно меньше межатомных расстояний (менее 10^{-9} м) [15], оно должно обладать ярко выраженными корпускулярными свойствами и менее выраженными волновыми [16]. Вследствие этого линзовые оптические системы, способные работать в спектральном диапазоне гамма-излучения, отсутствуют. Альтернативной линзовым системам в этой спектральной области является кодирующая апертура, принцип действия которой поясняется рис. 6.

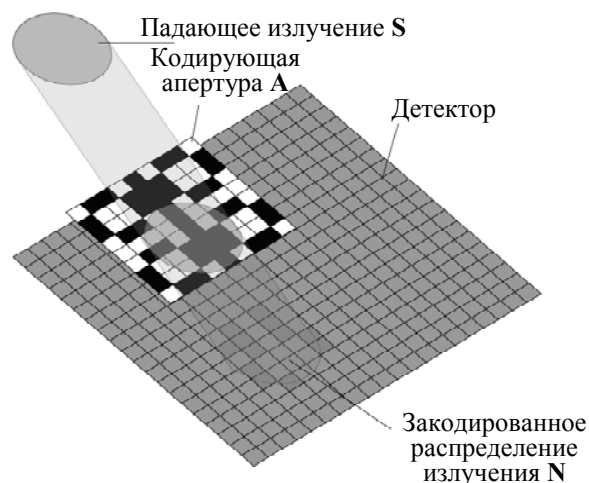


Рис. 6

В общем случае поток от источника гамма-излучения измеряется Si-ФЭУ, который предоставляет информацию о пространственном распределении S излучения источника в виде дискретного набора чисел, соответствующих количеству фотонов, взаимодействовавших с детектором за время экспозиции. Таким образом, отклик детектора гамма-излучения представляется в виде двумерной матрицы N , элементы которой содержат информацию о числе взаимодействий с фотонами каждого детекторного элемента.

Сама кодирующая апертура также представляется в виде двумерной матрицы A . Матрица является бинарной: каждый ее элемент имеет значение 1, если элемент физической апертуры прозрачен для падающего излучения, и значение 0, если не прозрачен. При наличии

кодирующей апертуры поток от источника гамма-излучения модулируется, в результате чего матрица \mathbf{N} зависит от конфигурации матрицы \mathbf{A} :

$$\mathbf{N} = \mathbf{S} * \mathbf{A} + \mathbf{U} ,$$

где \mathbf{U} — распределение шумовой составляющей сигнала, снимаемого с детектора, „*“ — оператор свертки.

Последующая обработка изображения \mathbf{N} позволяет получить реконструированное изображение \mathbf{F} , соответствующее пространственному расположению источника, путем свертки с матрицей декодирования \mathbf{G} :

$$\mathbf{F} = \mathbf{S} + \mathbf{U} * \mathbf{G} .$$

Матрица декодирования \mathbf{G} соответствует матрице апертуры \mathbf{A} , являясь ее корреляционной инверсией. Способы нахождения элементов матрицы \mathbf{G} , зависящие от геометрии маски \mathbf{A} , рассматриваются далее.

Маска кодирующей апертуры может быть сформирована несколькими способами. На сегодняшний день наиболее часто применяется маска MURA (Modified Uniformly Redundant Array — модифицированная равномерно избыточная матрица), которая может быть сгенерирована в линейной, квадратной или гексагональной конфигурации [17].

Линейная маска MURA может иметь длину L , если это число является простым и удовлетворяет условию

$$L = 4m + 1, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Тогда маска апертуры кодируется согласно следующему выражению:

$$A_i = \begin{cases} 0, & \text{если } i = 0; \\ 1, & \text{если } x^2 \equiv i \pmod{L}, \quad i \neq 0; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Выражение $x^2 \equiv i \pmod{L}$ означает, что число i является квадратичным вычетовом по модулю L . Это условие выполняется, если число i удовлетворяет критерию Эйлера:

$$i^{(L-1)/2} \equiv 1 \pmod{L} .$$

Элементы матрицы реконструкции \mathbf{G} для случая линейной апертуры вычисляются следующим образом:

$$G_i = \begin{cases} +1, & \text{если } i = 0; \\ +1, & \text{если } A_i = 1, \quad i \neq 0; \\ -1, & \text{если } A_i = 0, \quad i \neq 0. \end{cases}$$

Примеры линейных масок MURA разной длины показаны на рис. 7.



Рис. 7

Для согласования с двумерным (матричным) детектором чаще применяется квадратная конфигурация MURA. Для того чтобы сгенерировать ее маску, необходимо задать количество элементов p , которое должно быть простым числом. Затем маска кодируется согласно следующим выражениям:

$$A_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i = 0; \\ 1, & \text{если } j = 0, i \neq 0; \\ 1, & \text{если } C_i C_j = +1; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\text{где } C_i = \begin{cases} +1, & \text{если } x^2 \equiv i \pmod{p}; \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Элементы соответствующей матрицы декодирования определяются как

$$G_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{если } i + j = 0; \\ +1, & \text{если } A_{ij} = 1, i + j \neq 0; \\ -1, & \text{если } A_i = 0, i + j \neq 0. \end{cases}$$

После того как маска \mathbf{A} сгенерирована, формируется собственно конфигурация апертуры (рис. 8).

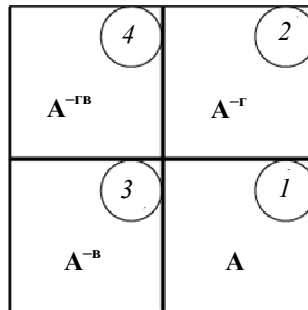


Рис. 8

Полученная матрица \mathbf{A} занимает позицию 1. Матрица \mathbf{A}^{-T} , представляющая собой отражение матрицы \mathbf{A} по вертикали, занимает позицию 2. Матрица \mathbf{A}^{-B} , являющаяся отражением матрицы \mathbf{A} по горизонтали, занимает позицию 3. На позицию 4 ставится матрица \mathbf{A}^{-TB} , представляющая отражение матрицы \mathbf{A} по горизонтали и вертикали. При совмещении центральные элементы четырех матриц должны совпадать таким образом, чтобы размер результирующей апертуры был $(2p-1) \times (2p-1)$. Примеры квадратных масок MURA разных размеров, сформированных по описанному алгоритму, показаны на рис. 9.

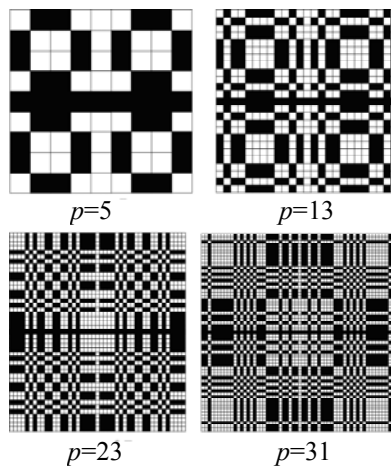


Рис. 9

Гексагональная конфигурация маски MURA применяется с круглыми детекторами, такими как вакуумный фотоэлектронный умножитель. Она формируется путем упорядочения линейной маски MURA в соответствии с алгоритмом, подробно описанным в работе [18].

Таким образом, для формирования пространственного распределения гамма-излучения необходимо использовать кодирующую апертуру заданной конфигурации. Восстановление закодированного изображения производится с помощью матрицы декодирования, соответствующей конфигурации матрицы апертуры. Восстановленное вышеизложенным способом изображение приводится в форму, пригодную для визуального анализа или последующей математической обработки.

Система визуализации гамма-излучения. На основании вышеизложенных результатов теоретических исследований разработана структурная схема системы визуализации гамма-излучения, показанная на рис. 10.

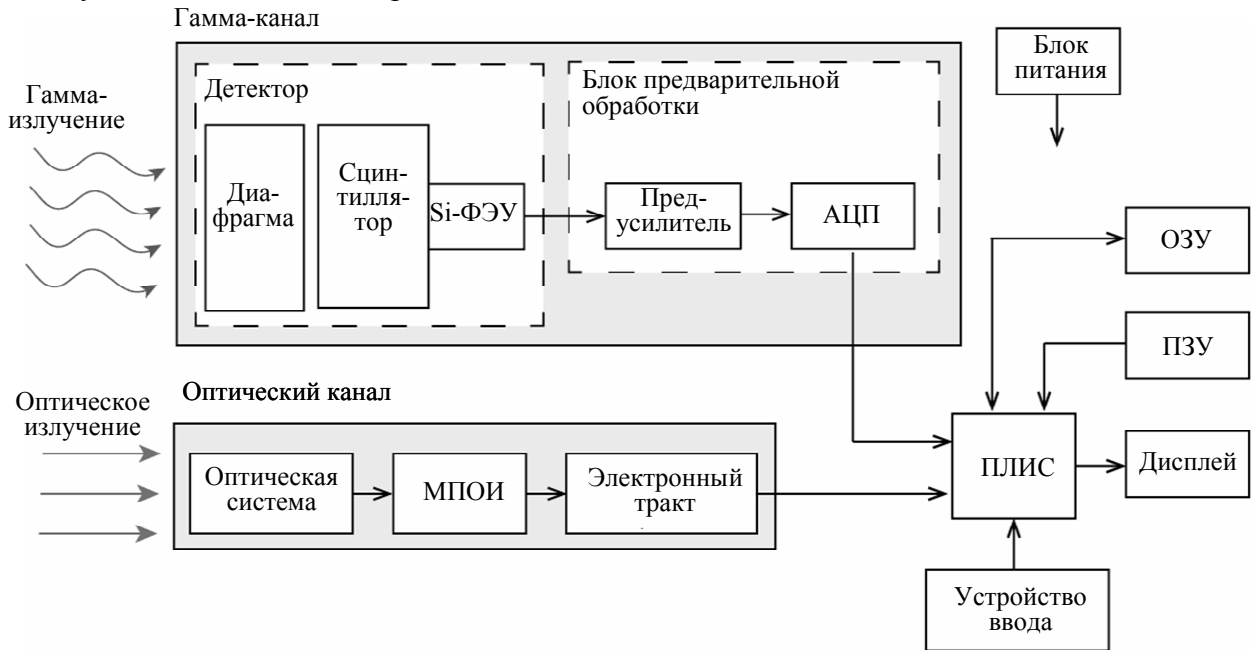


Рис. 10

Система визуализации гамма-излучения состоит из двух автономных каналов — оптического и гамма-канала, сигналы с которых обрабатываются программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) и отображаются в виде комплексированного изображения на дисплее.

Гамма-канал содержит детектор гамма-излучения и блок предварительной обработки. Детектор состоит из Si-ФЭУ, оптически сопряженного со сцинтилляционным кристаллом, и кодирующей апертуры, которая формирует пространственное распределение гамма-излучения на сцинтилляционном детекторе. Сцинтиллятор преобразует попавшее на него гамма-излучение в оптическое, которое затем фиксируется и усиливается Si-ФЭУ. После этого аналоговый сигнал с детектора направляется в блок предварительной обработки, где усиливается предусилителем и оцифровывается с помощью АЦП. Полученный цифровой сигнал поступает для обработки в ПЛИС. Оптический канал построен на основе матричного приемника излучения (МПОИ) видимого диапазона спектра (0,38—0,78 мкм), преобразующего формируемое оптической системой изображение в электрический сигнал, который с помощью электронного тракта передается в ПЛИС.

Для хранения промежуточных значений в системе используется оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), для хранения настроек системы — постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Блок питания обеспечивает необходимый уровень напряжения питания компонентов.

После передачи зарегистрированных сигналов, соответствующих пространственному распределению излучения оптического и гамма-диапазонов, ПЛИС выполняет их совместную

обработку методом комплексирования и последующую визуализацию результирующего изображения.

Таким образом, описанная схема системы визуализации обеспечивает высокую наглядность и эффективность детектирования и мониторинга гамма-излучения.

Заключение. В статье изложены физические принципы формирования гамма-изображения в системах визуализации гамма-излучения. Показаны основные процессы, происходящие в сцинтилляционных кристаллах при взаимодействии с гамма-излучением, а именно фотоэффект, комптоновское рассеяние и генерация пар, а также рассчитаны сечения этих процессов в отдельности в зависимости от энергии гамма-квантов. На основании этих зависимостей, рассчитанных для кристаллов NaI(Tl), CsI(Tl), LYSO, показано, что наибольшим эффективным сечением фотоэффекта обладают «тяжелые» материалы. Кроме того, рассчитаны линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения для указанных кристаллов.

Рассмотрены принцип формирования гамма-изображения, основанный на использовании кодирующей апертуры, и принцип восстановления закодированного изображения. Также представлены способы создания кодирующей апертуры типа MURA различных конфигураций. Указанные результаты позволяют реализовать визуализацию гамма-излучения сцинтилляционным методом с использованием Si-ФЭУ.

Предложена схема системы визуализации гамма-излучения, состоящая из оптического канала и гамма-канала, каждый из которых формирует изображения в соответствующем спектральном диапазоне. Результирующее изображение обеспечивает высокую эффективность детектирования и мониторинга гамма-излучения.

Работа выполнена при софинансировании фундаментальных и прикладных НИР из централизованных средств Университета ИТМО (проект 418228).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sánchez F., Benlloch J. M., Escat B., Pavón N., Porrás E., Kadi-Hanifi D., Ruiz J. A., Mora F. J., Sebastià A.* Design and tests of a portable mini gamma camera // *Medical Physics*. 2004. Vol. 31, N 6. P. 1384—1397.
2. Пат. 2426151 РФ, 2010102783/28. Малогабаритное устройство для визуализации источников гамма-излучения / *О. Е. Лапин, А. Н. Власенко, В. П. Демченков, А. Ф. Первишко*. 10.08.2011.
3. CANBERRA. Cartogam Real-Time Portable Gamma-Ray Imaging System [Электронный ресурс]: <<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA344/gamma%20imaging.pdf>>.
4. *Okada K., Tadokoro T., Ueno Y., Nukaga J., Ishitsu T., Takahashi I.* Development of a gamma camera to image radiation fields // *Progress in Nuclear Science and Technology*. 2014. Vol. 4. P. 14—17.
5. Polaris-H Imaging Spectrometer for Nuclear Power Plants [Электронный ресурс]: <<https://www.h3dgamma.com/nuclearProducts.php>>.
6. *Мартынюк Ю. Н., Вишневецкий И. Б.* Промышленный прототип портативной гамма-камеры для применения на объектах атомной энергетики // *Журн. „АНРИ“*. 2016. № 4. С. 13—23.
7. *Park H. M., Joo K. S.* Development and performance characteristics of personal gamma spectrometer for radiation monitoring applications // *Sensors*. 2016. Vol. 16, N 6. P. 919.
8. *Becker E. M., Farsoni A. T.* Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2014. Vol. 761. P. 99—104.
9. *Rodnyi P. A.* Physical Processes in Inorganic Scintillators. N.Y. : CRC Press, 1997. 240 p.
10. *Васильев А. Н., Михайлин В. В.* Введение в спектроскопию диэлектриков. Ч. II. Вторичные процессы. М.: Изд-во „Университетская книга“, 2010. 238 с.
11. *Leo W. R.* Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach. Springer Science & Business Media, 2012. 382 p.

12. Шендрик Р. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Ч. 3. Введение в физику сцинтилляторов – 1: Учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2013. 110 с.
13. Klein O., Nishina Y. Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac // Zeitschrift für Physik. 1929. Vol. 52, N 11—12. P. 853—868.
14. Saint-Gobain Crystals. Crystal Scintillation Materials [Электронный ресурс]: <<http://www.crystals.saint-gobain.com/products/crystal-scintillation-materials>>.
15. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М.: Наука, 1980. 728 с.
16. Гречухин Д. П. Гамма-излучение // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия; Большая Российская энциклопедия, 1988—1999.
17. Gottesman S. R., Fenimore E. E. New family of binary arrays for coded aperture imaging // Applied Optics. 1989. Vol. 28, N 20. P. 4344—4352.
18. Finger M. H., Prince T. A. Hexagonal uniformly redundant arrays for coded-aperture imaging // Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray Conference. Goddard Space Flight Center, Green Belt, MD, USA. 1985. Vol. 3. P. 295—298.

Сведения об авторах

- Анна Владимировна Васильева** — Университет ИТМО; инженер; E-mail: avasileva@corp.ifmo.ru
Виктория Александровна Рыжова — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО;
 E-mail: victoria_ryz@corp.ifmo.ru
Александр Сергеевич Васильев — канд. техн. наук; Университет ИТМО; ассистент;
 E-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию
08.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Васильева А. В., Рыжова В. А., Васильев А. С. Визуализация источников гамма-излучения с использованием сцинтилляционного метода и кодирующей апертуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 56—68.

VISUALIZATION OF GAMMA-RAY SOURCES USING THE SCINTILLATION METHOD AND CODING APERTURE

A. V. Vasilieva, V. A. Ryzhova, A. S. Vasiliev

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: avasileva@corp.ifmo.ru

Theoretical aspects of gamma image formation based on the scintillation method with the use of solid-state silicon photoelectron multiplier and coding aperture are considered. The physical processes occurring in the scintillator under the action of ionizing radiation and leading to generation of visible radiation are discussed. The effective cross sections of the photoelectric effect, Compton scattering, and electron-positron pair generation are calculated depending on the gamma-quantum energy. Parameters of several scintillation crystals with different physical properties and gamma-ray attenuation efficiency are presented. Principle of operation of the coding aperture intended for formation of gamma image is considered, and ways of realization of its various configurations are described. A block diagram of a gamma-radiation visualization system providing high visibility and efficiency of gamma sources monitoring is proposed.

Keywords: gamma-visualization, SiPM, scintillator, gamma-ray absorption, coding aperture

REFERENCES

1. Sánchez F., Benloch J.M., Escat B., Pavón N., Porras E., Kadi-Hanifi D., Ruiz J.A., Mora F.J., Sebastià A. *Medical physics*, 2004, no. 6(31), pp. 1384—1397.
2. Patent RU 2426151, *Malogabaritnoye ustroystvo dlya vizualizatsii istochnikov gamma-izlucheniya* (The Small-Sized Device for Visualization of Sources of Gamma Radiation), Lapin O.E., Vlasenko A.N., Demchenkov V.P., Pervishko A.F. Priority 10.08.2011. (in Russ.)
3. CANBERRA. *Cartogam Real-Time Portable Gamma-Ray Imaging System*, <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA344/gamma%20imaging.pdf>.
4. Okada K., Tadokoro T., Ueno Y., Nukaga J., Ishitsu T., Takahashi I. *Prog. Nucl. Sci. Tech.*, 2014, no. 4, pp. 14—17.
5. *Polaris-H Imaging Spectrometer for Nuclear Power Plants*, <https://www.h3dgamma.com/nuclearProducts.php>.

6. Martynyuk Yu.N., Vishnevskiy I.B. *ANRI*, 2016, no. 4, pp. 13–23.
7. Park H.M., Joo K.S. *Sensors*, 2016, no. 6(16), pp. 919.
8. Becker E.M., Farsoni A.T. *Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, no. 761, pp. 99–104.
9. Rodnyi P.A. *Physical Processes in Inorganic Scintillators*, NY, CRC Press, 1997, 240 p.
10. Vasil'yev A.N., Mikhaylin V.V. *Vvedeniye v spektroskopiyu dielektrikov. Chast' II. Vtorichnyye protsessy* (Introduction to Spectroscopy of Dielectrics. Part II. Secondary Processes), Moscow, 2010, 238 p. (in Russ.)
11. Leo W.R. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*, Springer Science & Business Media, 2012, 382 p.
12. Shendrik R.Yu. *Metody eksperimental'noy fiziki kondensirovannogo sostoyaniya. Chast' 3. Vvedeniye v fiziku stsintillyatorov* (Methods of Experimental Physics of the Condensed State. Part 3. Introduction to Physics of Scintillators), Irkutsk, 2013, 110 p. (in Russ.)
13. Klein O., Nishina Y. *Zeitschrift für Physik*, 1929, no. 11–12(52), pp. 853–868.
14. *Saint-Gobain Crystals. Crystal Scintillation Materials*, <http://www.crystals.saint-gobain.com/products/crystal-scintillation-materials>.
15. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. *Yadernaya fizika* (Nuclear Physics), Moscow, 1980, 728 p. (in Russ.)
16. Grechukhin D.P. *Gamma-izlucheniye. Fizicheskaya entsiklopediya* (Gamma Radiation in Physical Encyclopedia), Moscow, 1988–1999, ISBN 5-85270-034-7. (in Russ.)
17. Gottesman S.R., Fenimore E.E. *Applied optics*, 1989, no. 20(28), pp. 4344–4352.
18. Finger M.H., Prince T.A. *International Cosmic Ray Conference*, 1985, vol. 3.

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|--|
| Anna V. Vasilieva | — ITMO University; Engineer; E-mail: avasileva@corp.ifmo.ru |
| Viktoriya A. Ryzhova | — PhD, Associate Professor; ITMO University;
E-mail: victoria_ryz@corp.ifmo.ru |
| Aleksander S. Vasiliev | — PhD; ITMO University; Assistant; E-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru |

For citation: Vasilieva A. V., Ryzhova V. A., Vasiliev A. S. Visualization of gamma-ray sources using the scintillation method and coding aperture. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 1. P. 56–68 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-56-68