

Прототип гамма-камеры с кодирующей апертурой с позиционно-чувствительным спектрометрическим детектором на основе сцинтилляционного монокристалла CeBr_3

В работе описан прототип гамма-камеры с кодирующей апертурой, где впервые в качестве детектора применен сцинтилляционный монокристалл CeBr_3 с цифровым фотоэлектронным умножителем. Данный детектор обладает высокой эффективностью регистрации и позволяет накапливать энергетический спектр с высоким разрешением. В статье рассмотрено устройство камеры, ее рабочие параметры, даны примеры гамма-изображений.

Ю.Л.Теверовский

(НПП «Доза», г. Зеленоград)

Портативные системы получения визуальных изображений источников гамма-излучения, или гамма-камеры, применяются для широкого ряда задач в атомной энергетике [1-4]. Существует несколько основных типов гамма-камер: пинхольная камера, камера с кодирующей апертурой и комптоновская камера [5-8]. Пинхольные камеры просты в изготовлении, но не могут быть портативными; комптоновские камеры имеют высокую чувствительность и широкий энергетический диапазон, но принципиально не визуализируют гамма-кванты с энергией менее 250–300 кэВ. Для визуализации низкоэнергетического излучения применяют гамма-камеры с кодирующей апертурой, но детекторы у существующих камер имеют очень низкую

Ключевые слова:

гамма-камера, кодирующая апертура, сцинтиллятор, гамма-изображение.

чувствительность к гамма-квантам средних и высоких энергий (выше 500 кэВ).

Для получения камеры, лишенной описанных недостатков, можно объединить метод кодирующей апертуры и комптоновскую камеру. Такая попытка была предпринята для комптоновской камеры «Дельта-Т» совместной разработки фирмы *Datavan* [9] и НПП «Доза» [12], так как она построена по двухдетекторной технологии, что позволяет использовать один из детекторов в сочетании с кодирующей апертурой.

Описание детектора

В качестве детектора применен сцинтилляционный кристалл CeBr_3 размером $32 \times 32 \times 5$ мм. Он обладает малым временем высвечивания (~ 20 нс), высоким световыходом (~ 60000 фотонов/МэВ) и хорошим разрешением ($\sim 4\%$ для 661 кэВ). Дополнительные характеристики сцинтиллятора приведены в табл.1. К сцинтил-

Табл.1. Характеристики сцинтиллятора CeBr_3 .

Плотность	5,1 г/см ³
Гигроскопичность	Да
Длина волны (макс. эмиссия)	380 нм
Время высвечивания	20 нс
Световыход	60000 фотонов/МэВ
Показатель преломления	2,09
Разрешение	4% для энергии 661 кэВ
Собственный фон	Отсутствует

лятору на оптический клей крепится цифровой кремниевый фотоэлектронный умножитель *Philips DPC-3200-22* [10] (рис.1).

Он состоит из 16 независимых детекторов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из 4 пикселей. В каждом пикселе содержится 3200 элементарных лавинных фотодиодов. Общая чувствительная область фотоумножителя составляет 32×32 мм².

Определение координаты (X,Y,Z) взаимодействия гамма-кванта в сцинтилляторе происходит следующим методом. Фотоны световой

вспышки, образовавшейся при поглощении или рассеянии гамма-кванта в сцинтилляторе, испускаются изотропно. Первыми будут регистрироваться фотоны, попадающие на фотоумножитель без рассеяния (путь «а» на рис.2). При этом нерассеянные фотоны, попадающие на фотоумножитель под углом более θ_c (путь «b» на рис.2), не будут зарегистрированы из-за эффекта полного внутреннего отражения. Рассеянные фотоны (путь «с» на рис.2) будут регистрироваться позже из-за большей длины пробега и равномерно по всей площади фотоумножителя. Итоговое распределение зарегистрированных фотонов

Рис.1. Цифровой кремниевый фотоумножитель *Philips DPC-3200-22* и кристалл CeBr_3 .

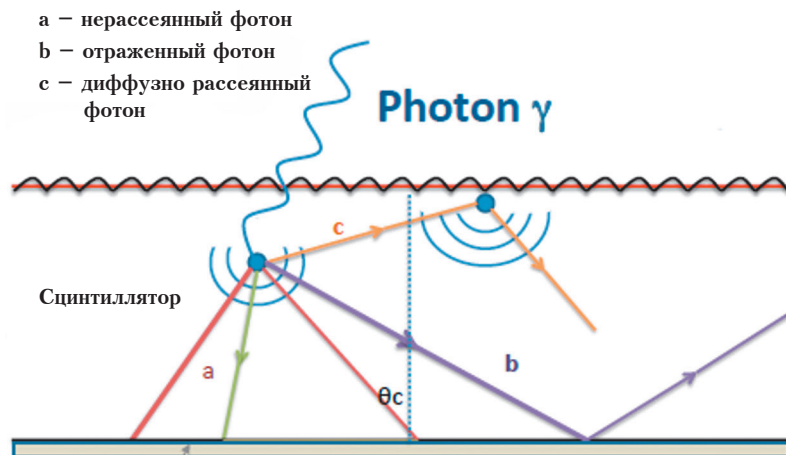
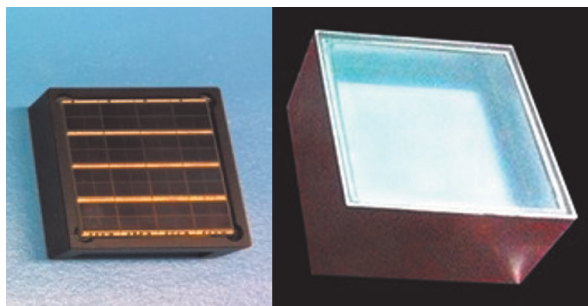


Рис.2. Распространение световой вспышки в сцинтилляторе.

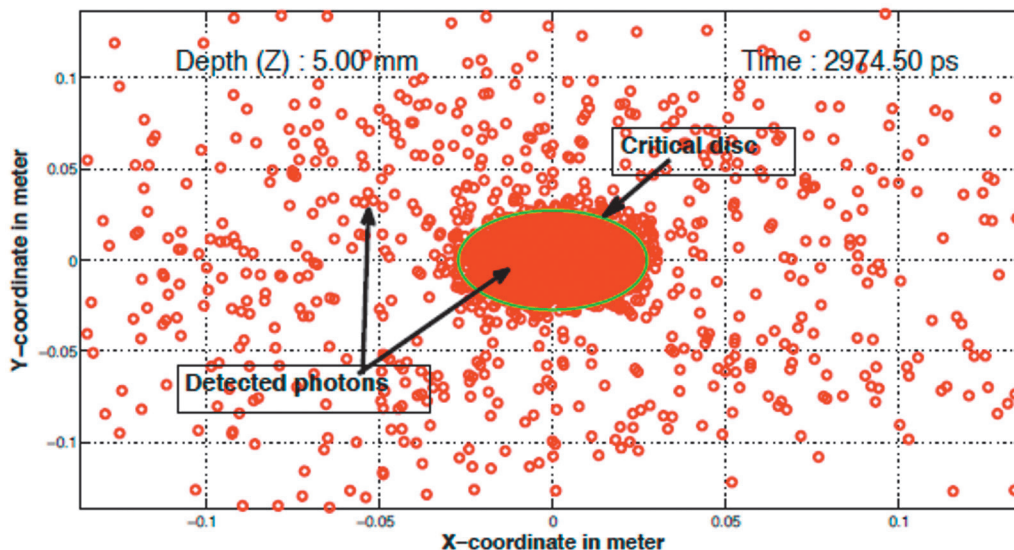


Рис.3. Карта зарегистрированных фотонов детектором. Область, ограниченная зеленым эллипсом, формируется нерассеянными фотонами.

вспышки по площади детектора будет как на рис.3. Область, ограниченная зеленым эллипсом, будет областью зарегистрированных нерассеянных фотонов. Центр эллипса определяет координаты X и Y , а длины его осей определяют координату Z , т. е. глубину взаимодействия налетающего гамма-кванта в сцинтиляторе.

В фотоумножитель *DPC-3200-22* встроена цифровая быстрая система считывания, которая запускается по первому зарегистрированному фотону и генерирует поток событий с временной меткой и координатами сработавших ячеек. Внешний процессор обрабатывает поток событий, определяет область зарегистрированных нерассеянных фотонов для конкретной вспышки и рассчитывает координаты взаимодействия гамма-кванта в сцинтиляторе. Более подробно с описанным методом можно ознакомиться в [11].

Для оценки пространственного разрешения детекторного модуля было получено изображение «маски» в виде креста с толщиной линии 1 мм (рис.4) с использованием источника $Ba-133$.

Пространственное разрешение детектора составило $\sim 1,7$ мм. Исходя из этого значения и геометрии детектора, была выбрана кодирующая апертура типа *MURA 11×11* с узором, изо-

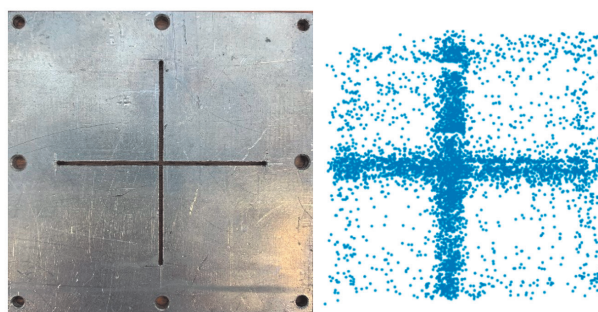


Рис.4. Свинцовая маска с крестом толщиной 1 мм (слева) и полученное изображение (справа).

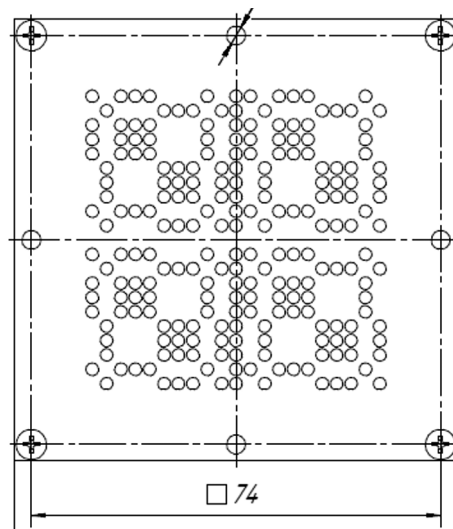


Рис.5. Кодирующая апертура *MURA 11×11*.

браженном на рис.5. Данная «маска» обладает таким свойством, что при повороте «маски» на 90° ее открытые элементы переходят

в закрытые, и наоборот. Если первую половину времени экспозиции проводить для исходного положения «маски», а вторую для повернутого, затем вычесть из первой полученной теневой картины вторую, то немодулированная боковая подсветка сократится, а полезный модулированный «маской» сигнал сохранится. Такой метод иногда называют «маска-антимаска».

Обычно детекторы имеют неравномерную эффективность регистрации по площади, что может приводить к искажениям при восстановлении изображения. Поэтому необходимо набирать «белые» кадры – это теневые картины без маски. Они будут характеризовать возможные неоднородности детектора, и при нормировании на них качество получаемого изображения будет выше.

«Маска» крепится на расстоянии 35 мм от передней грани сцинтиллятора так, чтобы центральная ось «маски» совпадала с центральной осью сцинтиллятора. Внешний вид прототипа камеры в сборе приведен на рис.6. Блок детектирования охлаждается при помощи элемента Пельтье до температуры -10°C .

Результаты экспериментов

А. Точечный источник

В эксперименте использовались источники Am-241, Co-57 и Cs-137. Расстояние от источников до камеры варьировалось от 1 до 2 метров, время экспозиции составило 100–200 с.

На рис.7 показаны теневые картины в положении «маска».

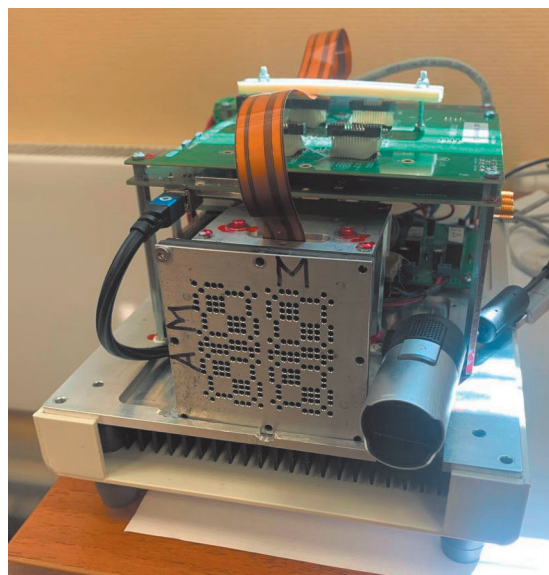


Рис.6. Внешний вид прототипа камеры (М – стандартное положение «маски», АМ – положение «антимаски»).

Система считывания детектора помимо информации о координате взаимодействия гамма-кванта позволяет также получить энергию зарегистрированного гамма-кванта. Набранные спектры для каждого источника приведены на рис.8–10.

Разрешение линии 661 кэВ источника Cs-137 составило $\sim 6,5\%$.

По полученным теневым изображениям (рис.7) видно, что на теневой картине Co-57 хорошо различим узор «маски». На теневой картине Am-241 он различим существенно хуже и не различим на теневой картине Cs-137. Также для всех источников видно наличие областей, в которых не зарегистрировано ни одного события – мертвые зоны. Чтобы определить, с чем связано наличие данных

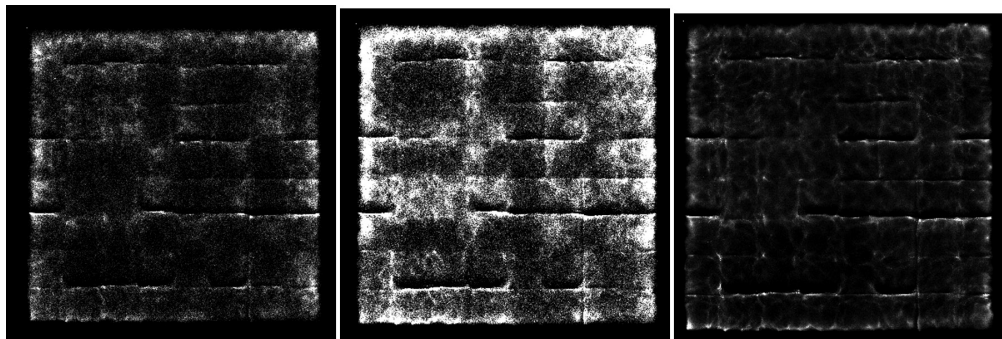


Рис.7. Теневые картины источников. Слева Am-241, в центре Co-57, справа Cs-137.

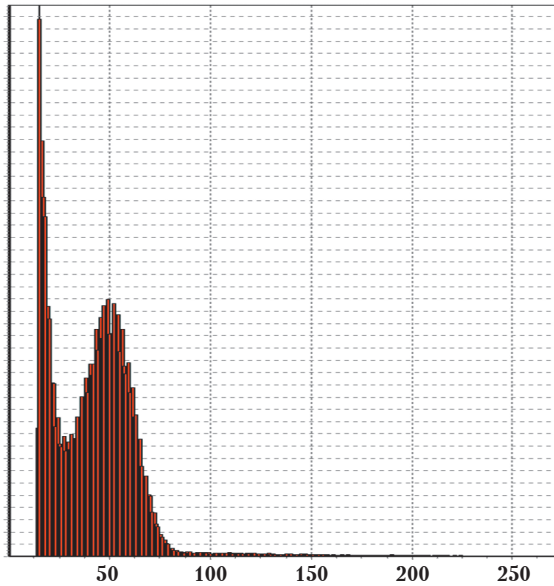


Рис.8. Спектр Am-241.

областей, для каждого источника были получены «белые» кадры (рис.11).

Можно заметить, что и на «белом» кадре мертвые зоны присутствуют в тех же местах, что и на теневых картинках с «маской», что, по-видимому, связано с особенностями конкретного детектора. Данные особенности необходимо учитывать при восстановлении итогового изображения.

Несмотря на то, что на теневых картинах (рис.7) Am-241 и Cs-137 не виден (либо плохо различим) узор «маски», изображение источника все равно восстанавливается (рис.12). Для этого дополнительно необходимо получить теневые изображения для положения «антимаска», а также теневые изображения без «маски» («белый» кадр). Итоговая теневая картина, из которой восстанавливается изображение источника, получается по формуле (подразумеваются попиксельные операции над получаемыми изображениями):

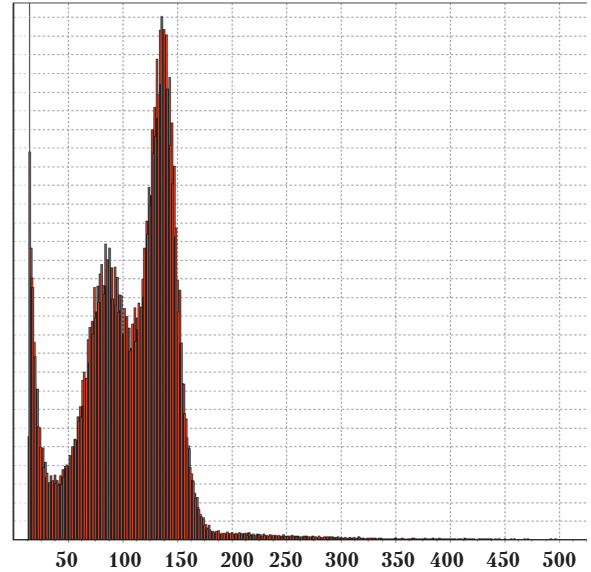


Рис.9. Спектр Co-57.

$$\text{Теневая картина} = \frac{\text{Маска} - \text{Антимаска}}{\text{Белый кадр}} \quad (1)$$

Б. Протяженный источник

Для оценки возможности визуализации распределенных источников проведен следующий эксперимент. Источник Co-57 установлен на расстоянии 50 см от края «маски». Проводится 5 измерений, в каждом из которых камера поворачивается на 3° относительно своей оси. В каждом положении набираются теневые картины для положения «маска» и «антимаска», затем происходит обработка. Время

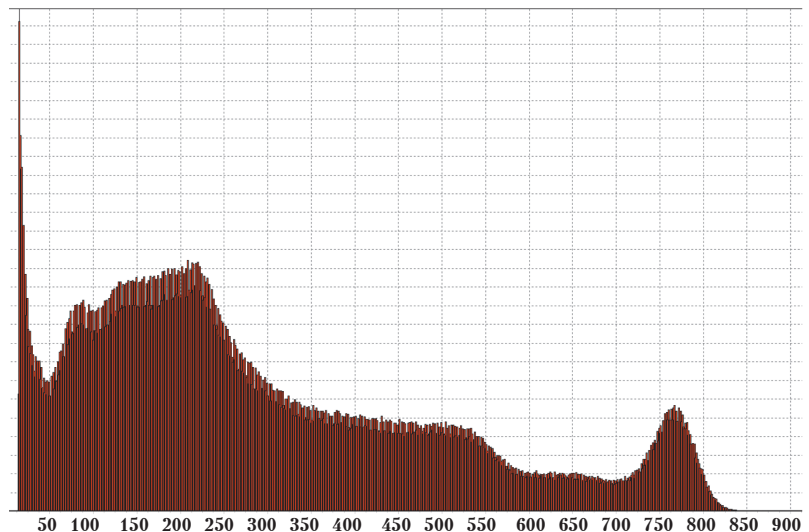
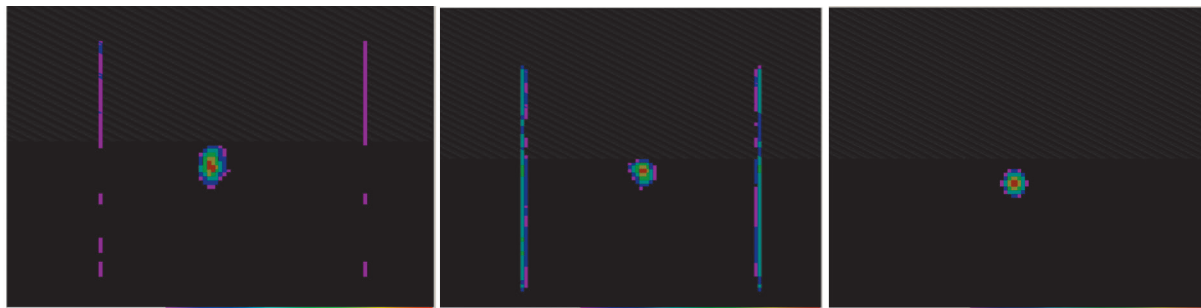
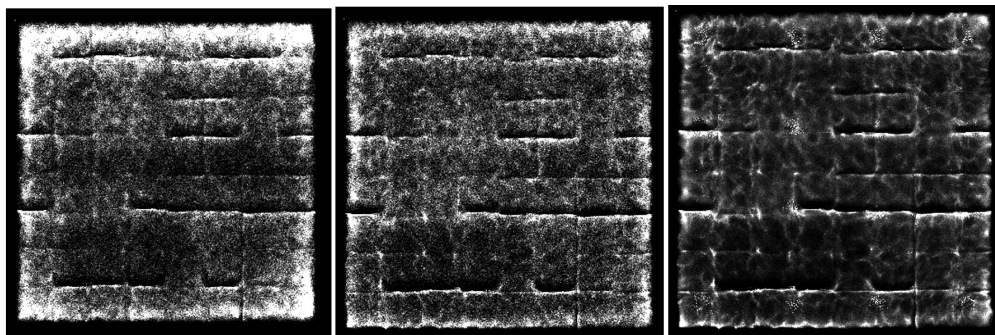


Рис.10. Спектр источника Cs-137.

Рис.11.

Белые кадры
источников.
Слева $Am-241$,
в центре $Co-57$,
справа $Cs-137$.

**Рис.12.** Восстановленные изображения источников. Слева $Am-241$, в центре $Co-57$, справа $Cs-137$.

экспозиции для каждой точки подбирается таким, чтобы количество зарегистрированных событий было одинаковым. Результат эксперимента приведен на рис.13.

Несмотря на то, что восстановленное изображение получилось протяженным, центральная часть выглядит более яркой, чем левый край. Это говорит о необходимости оптимизации алгоритма обработки.

В. Оценка нижнего предела визуализации

Источник $Co-57$ активностью 500 кБк располагался на расстоянии 50 см от «маски», что соответствует МАЭД 0,02 мкЗв/ч. Время

набора составило 50 с. Набор проводился для положений «маска» и «антимаска». При восстановлении только по теневой картине для положения «маска» на изображении наблюдаются артефакты (рис.14). При этом наиболее яркое пятно соответствует источнику излучения.

Для устранения артефактов достаточно провести обработку по теневой картине «маска–антимаска» (рис.15).

По результатам эксперимента можно сказать, что данный прототип камеры имеет очень высокую чувствительность, составляющую 2,5 нЗв для точечного источника $Cs-137$ в терминах дозовой экспозиции.

**Рис.13.** Восстановленное изображение протяженного источника.

Для источника Co-57 этот параметр составляет 0,14 нЗв.

Г. Несколько точечных источников

Наличие спектра источников излучения позволяет в случае присутствия источников с разной энергией получить изображение для каждого отдельного источника, тем самым делая итоговое изображение более качественным. Проведен эксперимент с двумя источниками: Cs-137 ($A = 10^8$ Бк) и Co-57 ($A = 34$ МБк). Расстояние до источников составляло 1,5 м, а между самими источниками – 25 см. Время измерения составило 100 с. Энергетический спектр приведен на рис.17. Источник Co-57 существенно слабее, и при попытке восстановить изображение по всему спектру получается только более мощный источник Cs-137 (рис.16).

Но если провести восстановление по пикам полного

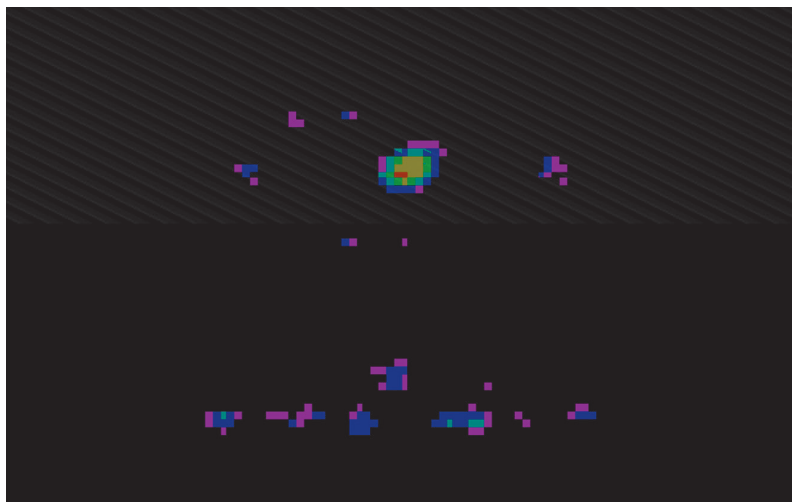


Рис.14. Изображение точечного источника Co-57, восстановленное по теневой картине положения «маска».

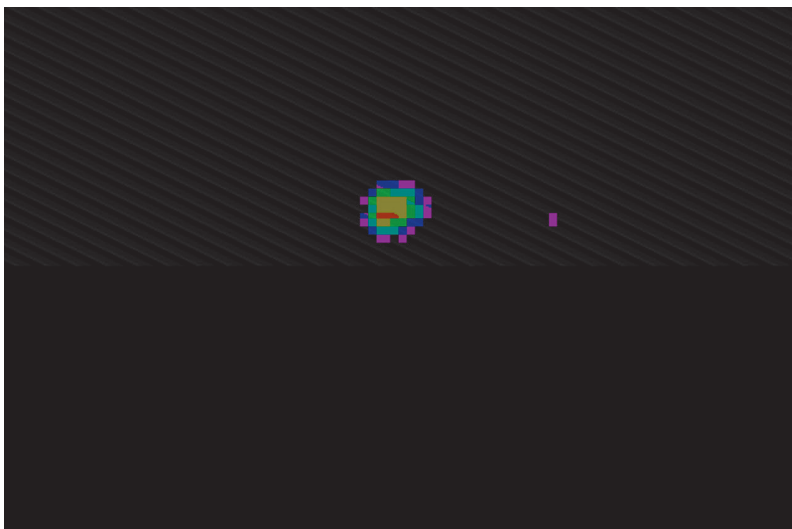


Рис.15. Изображение точечного источника Co-57, восстановленное по теневой картине «маска-антимаска».

Рис.16. Изображение источников Cs-137 и Co-57 при восстановлении по всему спектру. Источник Co-57 не виден.



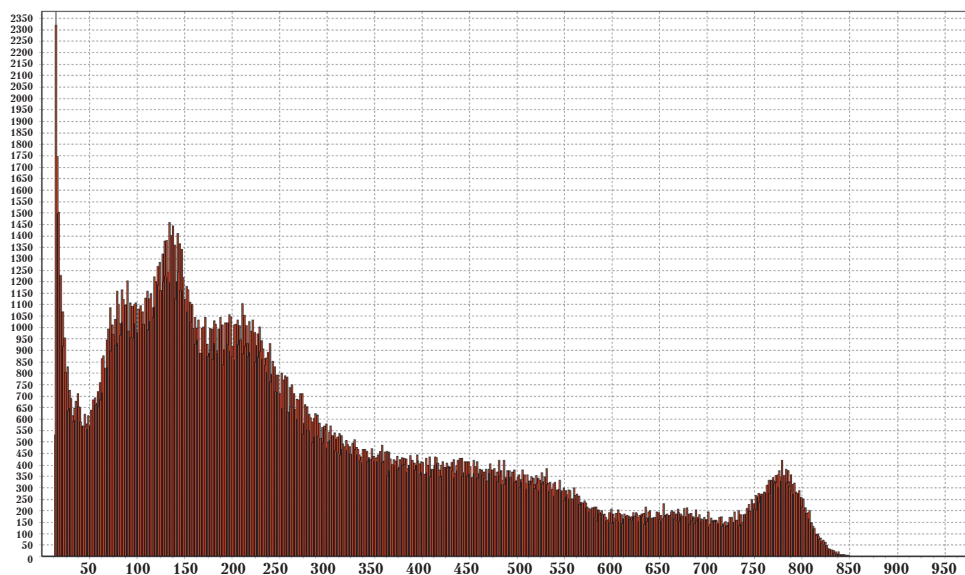


Рис.17.
Спектр
источников
Co-57 и
Cs-137.



Рис.18.
Изображение
источников
Cs-137 и Co-57
(справа –
гамма-изобра-
жение, слева –
наложенное
на фотогра-
фию).

поглощения источников, то источники разрешаются. Изображение приведено на рис.18.

Заключение

Изготовлен и протестирован прототип камеры с кодирующей апертурой на основе сцинтилляционного детектора CeBr_3 . Камера позволяет с высокой эффективностью визуализировать источники с энергиями от 50 до 661 кэВ. Хорошее энергетическое разрешение (6,5% для энергии 661 кэВ) позволяет проводить более детальный анализ источников излучения, в частности визуализировать источники с разными энергиями для одной экспозиции. Высокая чувствитель-

ность камеры позволяет проводить измерения быстрее, что в реальных условиях работы может сократить дозовую нагрузку на персонал.

Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию алгоритмов восстановления и создание программного обеспечения для эффективной работы с камерой.

Использование детектора, который уже применен в комптоновской камере, позволит эффективно создать комбинированную камеру, где будут объединены метод кодирующей апертуры и комптоновская камера. Такая камера объединит в себе достоинства обоих методов визуализации гамма-излучения.

Благодарность

Автор выражает благодарность О.П. Иванову за полезные обсуждения методов обработки первичных теневых изображений камеры.

Литература

1. Z. He, S.V. Guru, D.K. Wehe, G.F. Knoll, A. Truman, D. Ramsden, «Portable wide-angle γ -ray vision system», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, no. 4, pp. 668-674, 1995.
2. Волкович А.Г., Иванов О.П., Степанов В.Е., и др. Применение гамма-визора для обследования реакторов // Атомная энергия. 1995. т. 79. вып. 5. С. 367-370.
3. P.T. Durrant, M. Dallimore, I.D. Jupp and D. Ramsden, «The application of pinhole and coded aperture imaging in the nuclear environment», *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. A 422, pp. 667-671, 1999.
4. Волкович А.Г., Данилович А.С., Иванов О.П. и др. Гамма-визор – автоматизированная система для получения изображений радиоактивных объектов // ПТЭ 1996. № 3. С.131-135.
5. A.N. Sudarkin, O.P. Ivanov, V.E. Stepanov, A.G. Volkovich, A.S. Turin, A.S. Danilovich, D.D. Rybakov and L.I. Urutskoev, «High Energy Radiation Visualizer (HERV): A New System for Imaging in X-Ray and Gamma-Ray Emission Regions», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 4, pp. 2427-2433, 1996.
6. URL: <https://www.antech-inc.com/wp-content/uploads/G3050-data-sheet-1.7.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).
7. Система iPIX [online]. URL: <https://www.mirion.com/products/ipix-ultra-portable-gamma-ray-imaging-system> (дата обращения: 12.09.2022).
8. Polaris-H: Gamma-ray camera. URL: <http://www.h3dgamma.com/applications.html> (дата обращения: 12.09.2022).
9. Камера Temporal δ [online]. URL: <http://damavan-imaging.com/temporal-imaging-compton-camera-v3/> (дата обращения: 12.09.2022).
10. Z. Liu, Z. Pizzichemi, M. Auffray, E. Lecoq, P. Paganoni, M. Pizzichemi. Performance study of Philips digital silicon photomultiplier coupled to scintillating crystals. *Journal of Instrumentation*. 2016.
11. A. Iltis, H. Snoussi. «The Temporal PET Camera: A New Concept With High Spatial and Timing Resolution for PET Imaging», *Journal of Imaging*, no. 1(1), pp. 45-59, 2015.
12. Установка для спектрометрической и радиометрической идентификации, локализации и визуализации источников гамма-излучения гамма-визор «ДЕЛЬТА-Т» [online]. URL: <https://www.doza.ru/catalog/systems/6610/> (дата обращения: 16.09.2022).

Coded Aperture Gamma Camera Prototype Based on CeBr_3 Single Crystal Position-Sensitive and Spectrometric Detector

Teverovskiy Yury (SPC Doza, Ltd, Moscow, Zelenograd, Russia)

Abstract. Article describes coded aperture gamma camera with single crystal scintillator CeBr_3 detector coupled with digital silicon photomultiplier. This kind of detector shows high detection efficiency, have good spatial resolution and allow acquiring energy spectrum. Camera's structure and characteristics are discussed, received gamma images are given.

Key words: gamma camera, coded aperture, scintillator, gamma image.

Ю.Л.Теверовский (нач.гр.) – НПП «Доза», г. Зеленоград.

Контакты: тел. +7 (916) 584-16-51; e-mail: yurytever@doza.ru.