14

Моделирование монолитных детекторов позитронно-эмиссионных томографов на основе кристаллов Lu_2SiO_{5-z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}

© В.С. Цхай, М.В. Белов, В.А. Козлов, М.В. Завертяев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: vtskhay@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 10 июня 2025 г.
В окончательной редакции 21 июля 2025 г.
Принято к публикации 23 июля 2025 г.

Исследована зависимость характеристик монолитных детекторов позитронно-эмиссионных томографов от толщины сцинтилляционного кристалла и степени обработки поверхности. Для оценки разрешающей способности пластины использовалась искусственная нейронная сеть. Для расчетов применялась модель детектора на основе GEANT4. Модель состояла из кристалла Lu_2SiO_{5-z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+} с лицевой стороной 57.6×57.6 mm, соединенного с 64-канальным кремниевым фотоумножителем. Данные набирались для четырех вариантов детектора. Детектор облучался изотропным источником γ-квантов энергии 511 keV, находившимся на удалении в 35 cm. Наилучший результат был получен для детектора с 6 mm пластиной с грубой полировкой с разрешением 0.57 ± 0.01 mm в плоскости XY и 0.89 ± 0.01 mm по глубине (координате Z).

Ключевые слова: сцинтилляционные детекторы, позитронно-эмиссионная томография, искусственные нейронные сети, моделирование.

DOI: 10.21883/0000000000

Большинство современных коммерчески доступных позитронно-эмиссионных томографов (ПЭТ) в качестве детекторов использует большое число сцинтилляционных кристаллов малого размера ($2 \times 2 \times 20$ mm), собранных в блоки, соединенные с многоканальными кремниевыми или многоанодными фотоумножителями. Точка взаимодействия γ-кванта в такой сборке определяется по индексу кристалла, в котором зарегистрирована сцинтилляция. Альтернативой такой компановки являются „монолитные“ детекторы [1,2]. Монолитный детектор подразумевает замену сборок кристаллов цельными пластинами больших размеров. Координату взаимодействия в таком детекторе можно определить по распределению сигналов с многоканального фотоумножителя. Такая методика также позволяет использовать математические методы, которые могут повысить пространственное разрешение. Одним из таких методов является применение искусственных нейронных сетей (ИНС). Исследования показывают, что применение ИНС позволяет достичь высокой точности восстановления координаты взаимодействия. В настоящей работе при помощи моделирования оценивается пространственное разрешение нескольких вариантов детекторов.

Всего было смоделировано четыре варианта детектора. Модели были созданы на основе программной библиотеки GEANT4.

Монолитный детектор состоит из кристаллической пластины, соединенной с матрицей кремниевых фотоумножителей (рис. 1). В модели использовался $64(8 \times 8)$-канальный, 57.6×57.6 mm кремниевый фотоумножитель с параметрами, соответствующими Sensl ARRAYC-60035-64P-PCB. В качестве сцинтиллятора был взят кристалл Lu_2SiO_{5-z}:Y^{3+}:Ce^{3+}:Ca^{2+}. Размеры передней грани кристалла соответствуют размерам фотоумножителя. Толщина кристалла варьировалась (6 и 12 mm). Для параметризации свойств поверхности использовались таблицы GEANT4 LUT Davis.

Все варианты детекторов моделировались с покрытием из тефлоновой пленки. Оптические свойства кристалла моделировались на основе экспериментальных измерений [3]. Для каждой из толщин рассматривались две степени полировки поверхности: „грубая“ и „тонкая“. Грубая полировка моделировалась с параметрами шероховатости $R_a = 0.48\,\mu$m, $R_q = 0.57\,\mu$m, $R_{\max} = 3.12\,\mu$m. Для тонкой полировки использовались параметры $R_a = 20.8$ nm, $R_q = 26.2$ nm, $R_{\max} = 34.7$ nm. Данные настройки являются стандартными вариантами в GEANT4.

Между кристаллом и фотоумножителем располагался слой оптической смазки DOW CORNING Q2-3067.

В ходе моделирования детекторная сборка облучалась одиночными γ-квантами энергии 511 keV, испускаемыми изотропным точечным источником, находившимся на расстоянии 35 cm от центра пластины. Каждое испускание γ-кванта источником считалось единичным событием. Далее события отбирались в случае, если испущенный γ-квант выделял всю энергию в сцинтилляционном кристалле. Отобранные события разбивались на две группы. Первая группа состояла из событий, где перед полным поглощением γ-квант рассеивался за счет комптоновского взаимодействия один или большее число раз. Такие события обозначались как „комптоновские события“. События, где первое и единственное взаимодействие было фотоэффектом, обозначались как „события с фотоэффектом“.

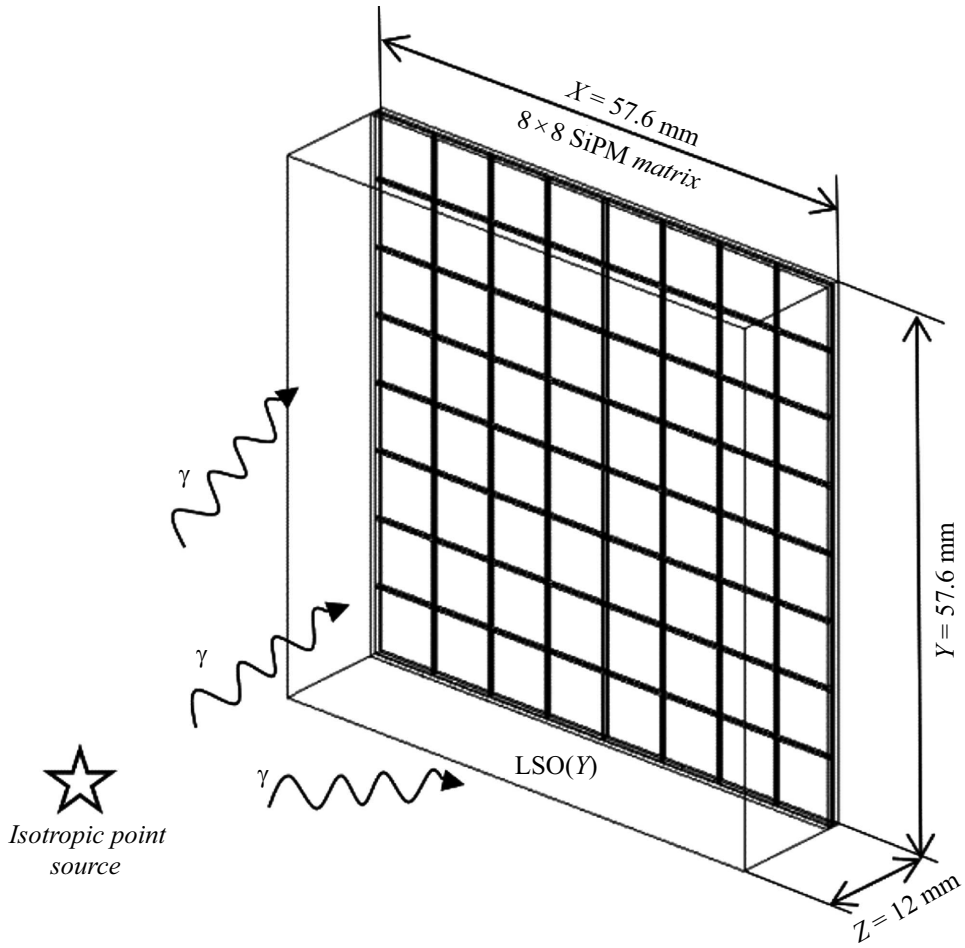

Рис. 1. Схема детектора.

Такое разбиение необходимо, так как в комптоновских событиях происходит несколько сцинтилляционных вспышек в разных точках кристалла, что будет влиять на точность восстановления координаты. В случае с фотоэффектом вспышка будет в одной точке.

Для каждого варианта кристалла было набрано 2 200 000 полезных событий (всего 8 800 000), половина из которых была комптоновскими событиями, а половина — событиями с фотоэффектом.

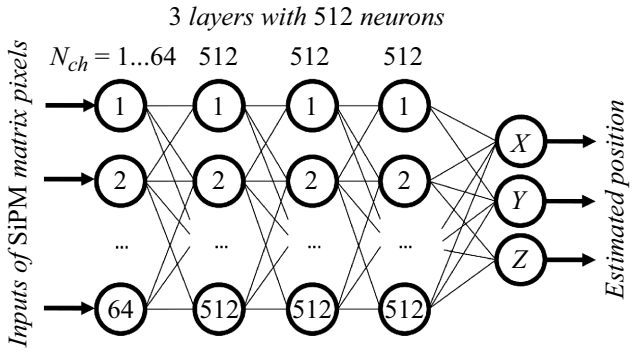

Рис. 2. Структура искусственной нейронной сети.

Также было набрано 2 200 000 событий с использованием квадратного источника размером 57.6 × 57.6 mm, расположенного напротив сцинтилляционной пластины и испускавшего γ-кванты перпендикулярно лицевой грани сцинтилляционного кристалла. Эти данные были набраны для исследования возможных эффектов, которые могут появляться при использовании коллимированных источников при обучении ИНС. Это сравнение важно, так как большинство работ, связанных с моделированием монолитных детекторов ПЭТ, использует коллимированные источники, в то время как реальные источники исследуемых ПЭТ всегда будут изотропными. Различные углы падения налетающих γ-квантов будут влиять на распределения вспышек в случае многократных комптоновских рассеиваний, что в свою очередь будет влиять на процесс обучения ИНС и точность восстановления координат взаимодействия.

Для восстановления точки взаимодействия использовалась простая ИНС [4] прямого действия, разработанная на C++. Сеть состояла из 64 входных нейронов, соответствующих каналам кремниевого фотоумножителя, и трех выходных нейронов, соответствующих координатам X, Y и Z. Число промежуточных (скрытых)

Таблица 1. Разрешение, получаемое при использовании различных вариантов ИНС для различных вариантов детектора

Слои	256 нейронов			512 нейронов			1024 нейронов		
	ΔX, mm	ΔZ, mm	ΔR, mm	ΔX, mm	ΔZ, mm	ΔR, mm	ΔX, mm	ΔZ, mm	ΔR, mm
6 mm тонкополированная пластина									
Один слой	0.62	1.34	1.59	0.57	1.27	1.5	0.55	1.16	1.4
Два слоя	0.59	1.11	1.39	0.55	1.04	1.3	0.55	0.99	1.25
Три слоя	0.58	1.1	1.38	0.56	1.06	1.32	0.54	1.14	1.38
6 mm грубополированная пластина									
Один слой	0.63	1.04	1.38	0.61	0.99	1.32	0.61	0.97	1.3
Два слоя	0.59	0.95	1.27	0.58	0.91	1.22	0.57	0.89	1.19
Три слоя	0.59	0.96	1.27	0.55	0.92	1.2	0.58	0.96	1.26
12 mm тонкополированная пластина									
Один слой	0.86	1.16	1.69	0.8	1.1	1.59	0.86	1.11	1.65
Два слоя	0.92	1.07	1.67	0.89	1.01	1.62	0.89	1.01	1.61
Три слоя	0.93	1.04	1.68	0.91	1.02	1.65	0.91	1.0	1.62
12 mm грубополированная пластина									
Один слой	0.89	1.16	1.72	0.93	1.13	1.72	0.92	1.13	1.71
Два слоя	0.99	1.14	1.8	0.95	1.12	1.76	0.96	1.07	1.7
Три слоя	0.98	1.1	1.77	0.97	1.08	1.73	0.93	1.09	1.72

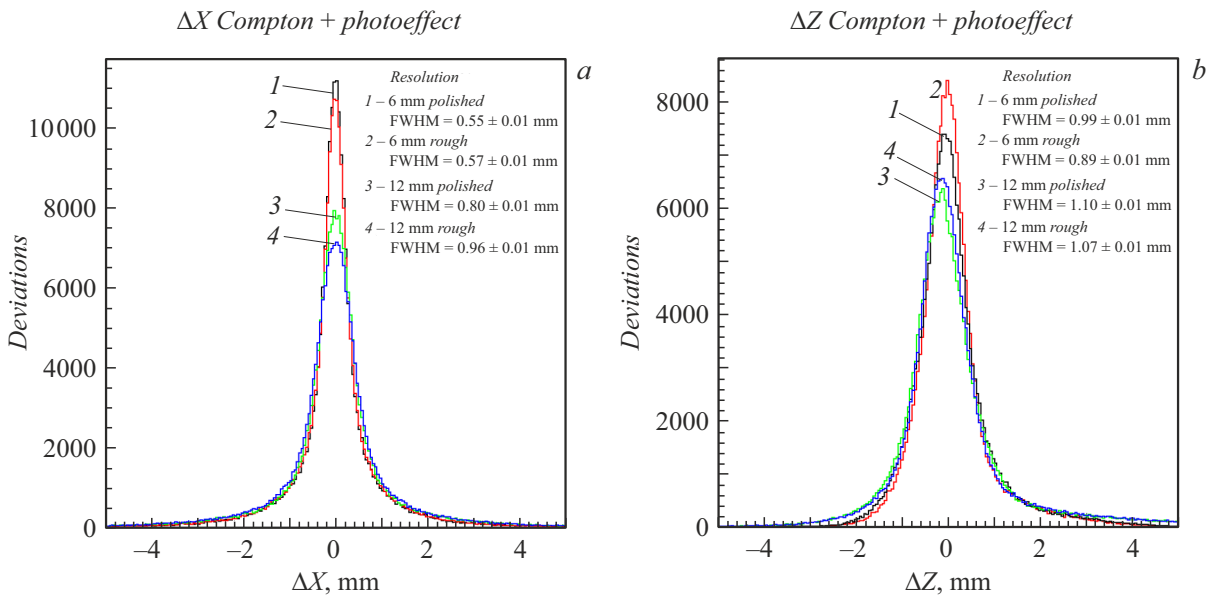

Рис. 3. Распределения отклонений восстановленных координат от реальных ΔX (*a*) и ΔZ (*b*) для всех вариантов детектора.

слоев варьировалось от 1 до 3. Число нейронов в слоях также варьировалось между 256, 512 и 1024. Всего испытывалось девять вариантов сети. В качестве функции активации применялась LReLU (leaky rectifying linear unit). Схема нейронной сети изображена на рис. 2.

ИНС обучалась с использованием алгоритма обратного распространения ошибки с градиентным спуском. В качестве входных данных использовались нормированные наборы сигналов, получаемых с ячеек фотоумножителя. В качестве выходных значений сети применялись координаты взаимодействия γ-кванта (в случае комптоновского взаимодействия использовались координаты первого взаимодействия). Для каждого набора данных 1 000 000 событий с фотоэффектом и комптоновскими взаимодействиями использовались для обучения (2 000 000 в сумме) и 200 000 для проверки работы сети. Коэффициент скорости обучения η линейно понижался каждые 100 событий от $\eta = 0.0005$ до 0.

Результаты обучения различных видов сети показаны в табл. 1 ($\Delta R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$). Для расчета пространственного разрешения для каждой из комбинаций величины отклонений восстановленных координат от реальных вносились в гистограммы с размером бина 0.01 mm. Так как форма получаемых распределений плохо аппроксимировалась стандартными функциями, разрешение находилось путем расчета ширины пика на

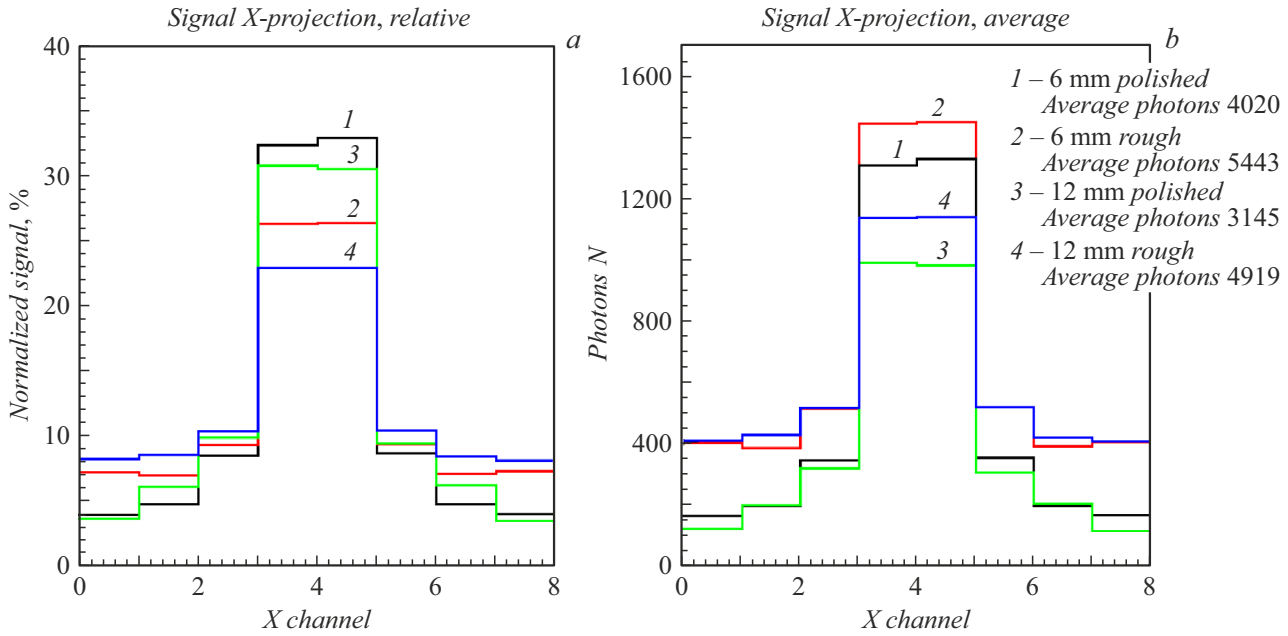

Рис. 4. Относительные (a) и абсолютные (b) значения сигналов при фотоэффекте в области размером $1 \times 1 \times 1$ mm в центре пластины.

Таблица 2. Эффективности поглощения γ-квантов в пластинах толщиной 12 и 6 mm для изотропного и коллимированного источников

Тип пластины, источник	Эффективность, %	Фотоэффект, %	Комптон-эффект, %
12 mm, коллимированный	41.51 ± 0.02	17.42 ± 0.02	23.71 ± 0.02
12 mm, изотропный	45.11 ± 0.02	19.74 ± 0.02	25.36 ± 0.02
6 mm, изотропный	24.08 ± 0.01	12.03 ± 0.01	12.05 ± 0.01

половине его высоты. Таким образом, погрешность соответствовала размеру бина гистограммы или 0.01 mm. Стоит отметить, что увеличение числа слоев и нейронов в сети не всегда приводит к лучшему результату. Это можно объяснить эффектом затухающего градиента, который проявляется в ИНС большого размера.

Распределение отклонения восстановленных координат взаимодействия от реальных показано на рис. 3. Для координат в плоскости XY тонкополированные пластины продемонстрировали лучший результат, в то время как распределения, полученные для грубополированных пластин, показали лучший результат при восстановлении координаты Z. В обоих случаях распределения для пластин толщиной 6 mm демонстрируют более высокую точность, чем для пластин толщиной 12 mm.

На рис. 4 приведены распределения сигналов от γ-квантов, которые поглотились в области размером $1 \times 1 \times 1$ mm в центре кристалла. Распределение показывает, что в случае с полированными пластинами относительная часть сигнала, попадающая в подложку, меньше, но потери света больше. Также важным фактором является то, что тонкие пластины будут иметь более низкую эффективность поглощения γ-квантов. Эффективности приведены в табл. 2.

Отдельно проводилось сравнение разрешения, получаемого при тренировке ИНС при помощи изотропного и плоского коллимированного источников. В обоих случаях оценивалось разрешение, получаемое для 12 mm грубополированной пластины. Для двуслойной ИНС с 512 нейронами на слой получаемые разрешения для коллимированного источника $\Delta X = 0.99 \pm 0.01$ mm, $\Delta Z = 1.10 \pm 0.01$ mm и $\Delta R = 1.76 \pm 0.01$ mm, что близко к значениям, приведенным в табл. 1. Наилучшее разрешение было получено при использовании 6 mm пластины с грубой полировкой со значениями 0.57 ± 0.01 mm для плоскости XY и 0.89 ± 0.01 mm вдоль оси Z (по глубине кристалла), $\Delta R = 1.19 \pm 0.01$ mm.

Степень полировки существенно влияет на разрешение и эффективность светосбора детектора. Распределения, полученные при использовании тонкополированных пластин, демонстрируют более высокое разрешение в плоскости XY, в то же время распределения для пластин с грубой полировкой показывают лучшее разрешение по глубине и более высокую эффективность светосбора.

Тонкие пластины в целом демонстрируют лучшее пространственное разрешение, теряя при этом эффективность поглощения γ-квантов. Нейронная сеть показывает зависимость результата от физических свойств модели и может быть использована как инструмент оценки разрешающей способности детекторов в процессе их разработки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] L.P. Clemens, J. Peter, Phys. Med., **104**, S98 (2022). DOI: 10.1016/S1120-1797(22)02345-6

[2] M. Freire, S. Echegoyen, A. Gonzalez-Montoro, F. Sanchez, A.J. Gonzalez, Med. Phys., **49** (8), 5616 (2022). DOI: 10.1002/mp.15792

[3] Ю.Д. Заварцев, М.В. Завертяев, А.И. Загуменный, А.Ф. Зерроук, В.А. Козлов, С.А. Кутовой, Кр. сообщ. по физике ФИАН, № 2, 13 (2013). [Yu.D. Zavartsev, M.V. Zavertyaev, A.I. Zagumennyi, A.F. Zerrouk, V.A. Kozlov, S.A. Kutovoi, Bull. Lebedev Phys. Inst., **40** (2), 34 (2013). DOI: 10.3103/S1068335613020024].

[4] G. Daniel, M.B. Yahiaoui, C. Comtat, S. Jan, O. Kochebina, J.-M. Martinez, V. Sergeyeva, V. Sharyy, C.-H. Sung, D. Yvon, Eng. Appl. Artif. Intell., **131**, 107876 (2024). DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107876