

УДК 539.1.074.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ МОДУЛЕЙ ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОГО ТОМОГРАФА НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ LFS-3 МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

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

*Было проведено моделирование методом Монте-Карло детекторного элемента для прототипа позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ) на основе многопиксельных кремниевых фотоумножителей и новых кристаллов-сцинтилляторов LFS-3 с целью оптимизации его характеристик, таких как световой выход и энергетическое разрешение. Указанные характеристики были рассчитаны для различных конфигураций обработки поверхности кристаллов и параметров укрывного материала. Самый высокий световой выход получен для детекторного модуля с отражателем Lumitor в качестве укрывного материала для поверхности сцинтилляционного кристалла, обработанной химическим способом. При вышеупомянутой конфигурации было достигнуто одно из лучших значений энергетического разрешения.*

**Ключевые слова:** позитронно-эмиссионная томография, сцинтилляционные монокристаллы, кремниевые фотоумножители, энергетическое разрешение, GEANT-4.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) – наиболее информативный метод диагностики в области ядерной медицины, который включает введение в организм радиофармпрепарата (РФП), меченого позитронно-излучающим короткоживущим радионуклидом, и последующую регистрацию аннигиляционных гамма-квантов детекторными элементами ПЭТ, состоящих из сцинтилляторов и фотоприемников.

Одной из главных задач при разработке ПЭТ-системы является минимизация дозы получаемой пациентом в ходе обследования, при сохранении качества изображения.

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: zavertyaevmv@lebedev.ru.

Дозовую нагрузку можно уменьшить путем повышения эффективности регистрации детекторных элементов, которые являются важнейшей частью ПЭТ-системы. Расчеты характеристик модулей ПЭТ на основе различных сцинтилляционных кристаллов методом Монте-Карло проводились ранее в ряде работ [1, 2].

В данной работе проводилось моделирование детекторного элемента для позитронно-эмиссионного томографа на основе новых сцинтилляционных кристаллов LFS-3 и кремниевых фотоумножителей (SiPm). Новые кристаллы LFS-3 ( $\text{Ce}_x\text{Lu}_{2+2y-x-z}\text{A}_z\text{Si}_{1-y}\text{O}_{5+y}$ ) – (Lutetium Fine Silicate) – неорганические сцинтилляторы нового поколения, разработаны Zecotek Photonics Inc. на основе кристаллов ортосиликата лютеция, кристаллизующихся в моноклинную систему с пространственной группой  $C2/c$ ,  $Z=4$ , где А – по крайней мере один элемент из группы Ca, Gd, Sc, Y, La, Eu, Tb [3]. LFS являются одними из самых быстрых кристаллов в настоящее время и будут активно использоваться в дальнейшем развитии модулей ПЭТ. Основные характеристики сцинтилляционных кристаллов LFS-3 в сравнении с кристаллом NaI(Tl) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Свойства кристаллов LFS-3 и NaI(Tl)

Материал	NaI(Tl)	LFS-3
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3.67	7.35
Точка плавления, °С	651	2000
Радиационная длина $X_0$ , см	2.59	1.15
Коэффициент поглощения для 511 кэВ, см <sup>-1</sup>	0.34	0.9
Световыход, фотонов/МэВ	40000	38000
Время высвечивания, нс	230	35
Максимум эмиссии, нм	410	425
Показатель преломления, $n$ , в максимуме эмиссии	1.85	1.81
Твердость, Моос	2	5
Гигроскопичность	Да	Нет

Спектральная чувствительность используемого в моделировании кремниевого ФЭУ Hamamatsu MPPC S13360-3050VE лежит в области длин волн 320–900 нм, с максимумом

при 450 нм. Эффективность регистрации фотонов (PDE) для 450 нм составляет 40%, размер чувствительной области равен  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  [4].

Для моделирования используется набор библиотек GEANT4, версии 10.6.p1. Более подробное описание моделирования физических процессов находится в GEANT4 physical reference manual [5]. Так как GEANT4 включает в себя в основном модели для взаимодействия физики высоких энергий, расчеты низкоэнергетических электромагнитных процессов осуществлялись при помощи дополнительной модели EM “Livermore”. Моделирование транспорта оптических фотонов включалось при помощи отдельной опции, присутствующей в описании GEANT4 [5]. Так же для моделирования поверхностей использовался набор эмпирических таблиц G4RealSurface2.1.1.

Моделируемый модуль состоял из кристалла LFS с размерами  $3 \times 3 \times 20 \text{ мм}^3$  и кремниевое ФЭУ Hamamatsu MPPC, находящегося в контакте с одним из торцов, который моделировался как прозрачный. Все остальные поверхности кристалла предполагались покрытыми различными отражателями.

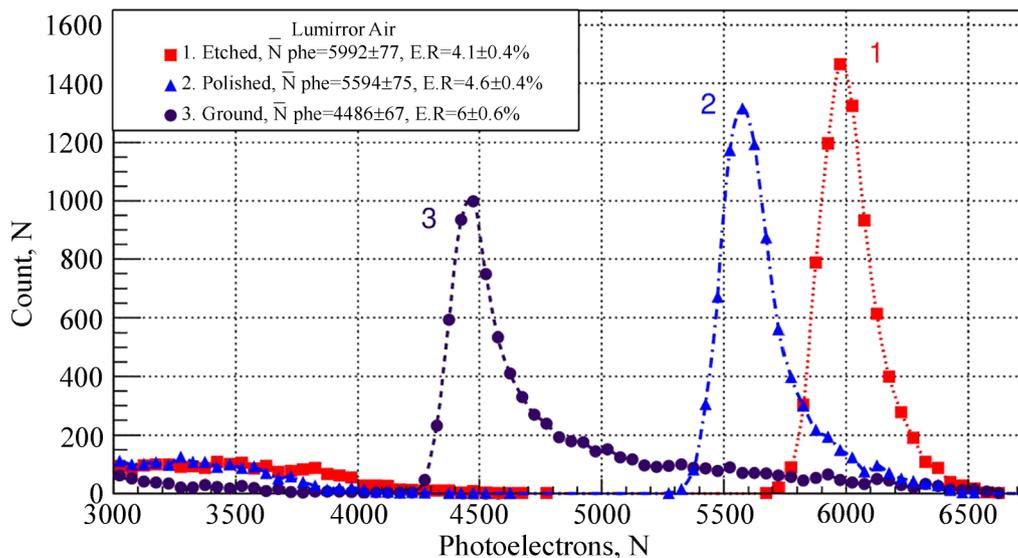


Рис. 1: Распределения фотоэлектронов от кристалла LFS-3, облученного гамма-квантами 511 кэВ для отражателя Lumirror.

Для моделирования были заданы следующие параметры кристалла: химический состав, плотность, длина поглощения и коэффициент преломления для оптических фотонов в зависимости от их длины волны; среднее число фотонов, испускаемых при сцинтилляции на 1 МэВ энергии, выделенной в кристалле. Распределение по спектру испускаемых фотонов моделировалось в соответствии с экспериментальным спектром

эмиссии кристалла. Для моделирования квантовой эффективности кремниевого ФЭУ использовалась таблица, взятая из описания Hamamatsu MPPC S13360-3050VE [4].

В качестве материалов обертки модулей рассматривались эффективные диффузные отражатели Туvek и Lumirror с коэффициентами отражения 0.97 и 0.98, соответственно [6], а поверхность кристалла – как механически полированная (polished), обработанная пиррофосфорной кислотой (etched) и необработанная (ground).

При моделировании рассматривался мононаправленный моноэнергетический источник гамма-квантов 511 кэВ, находящийся на расстоянии 50 мм от торца детекторного элемента.

На рис. 1–3 представлены полученные смоделированные распределения фотоэлектронов для ПЭТ модулей на основе LFS-3 для различной обработки поверхности кристаллов и отражателей Туvek и Lumirror. Полученные статистические ошибки моделирования не превышают размера точек.

В случае отражателя Lumirror моделировались два варианта: (Glue) – когда отражатель был приклеен к кристаллу и (Air) – когда был воздушный зазор между отражателем и кристаллом.

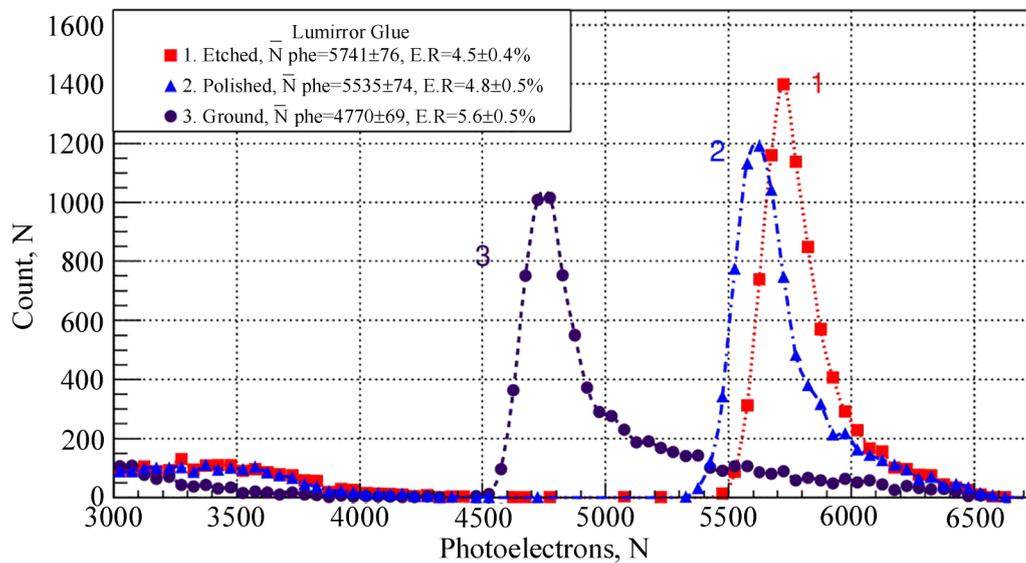


Рис. 2: Распределения фотоэлектронов от кристалла LFS-3, облученного гамма-квантами 511 кэВ для отражателя Lumirror+Glue.

В случае отражателя Туvek моделировался вариант только с воздушным зазором между отражателем и кристаллом.

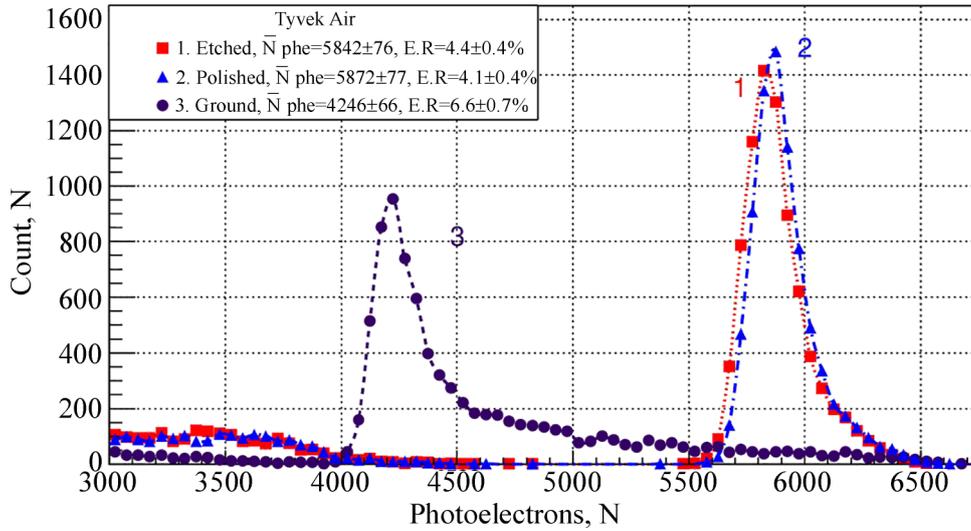


Рис. 3: Распределения фотоэлектронов от кристалла LFS-3, облученного гамма-квантами 511 кэВ для отражателя Tyvek.

Вся обработка данных проводилась с помощью библиотеки ROOT [7]. Для каждого распределения вычислялись световыход (как среднее число фотоэлектронов  $N_{phe}$ ) и энергетическое разрешение E.R (как отношение  $FWHM/N_{phe}$ , где FWHM – полная ширина на половине высоты) путем фитирования методом наименьших квадратов фотопика гауссианой.

На диаграммах ниже (рис. 4, 5) представлены смоделированные нормализованные значения световыхода и энергетического разрешения для всех рассмотренных комбинаций параметров укрывного материала и степени обработки поверхности.

Значение световыхода  $N_{phe}=5992$  для комбинации химической полировки поверхности (etched) и отражателя Lumirror при наличии воздушного зазора (Lumirror-Air) было принято за 100%. Энергетическое разрешение для комбинации необработанная поверхность (ground) и отражателя Tyvek, равное  $E.R=6.6\%$ , было принято за 100%.

Для детекторных модулей с необработанной поверхностью кристалла получен низкий световыход и большие значения энергетического разрешения для всех отражателей. Для модулей с отражателем Lumirror в варианте Lumirror+Glue характеристики (световыход и разрешение) хуже по сравнению с отражателем Lumirror-Air.

Таким образом, исходя из полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования конфигурации поверхности детекторного модуля, включающей использование диффузного отражателя Lumirror-Air, и химического способа

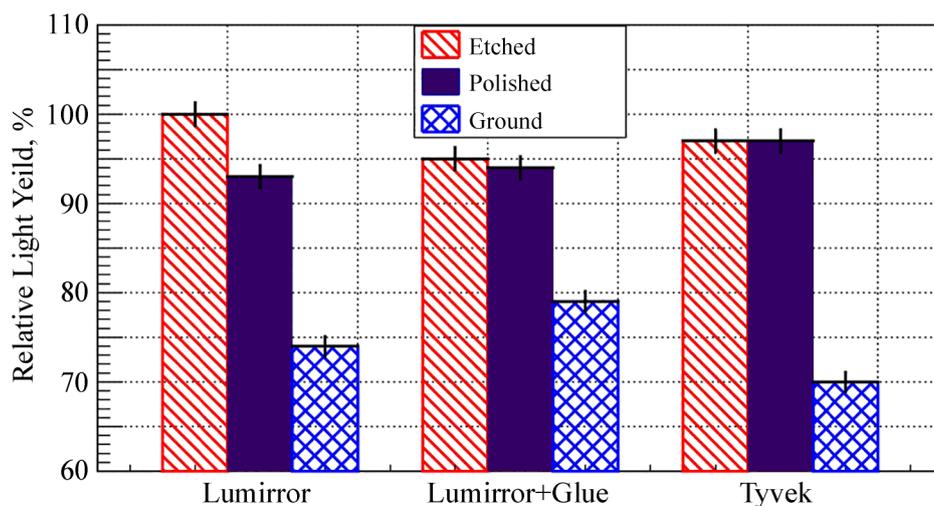


Рис. 4: Относительный световой выход модуля в зависимости от отражателя и обработки поверхности кристалла.

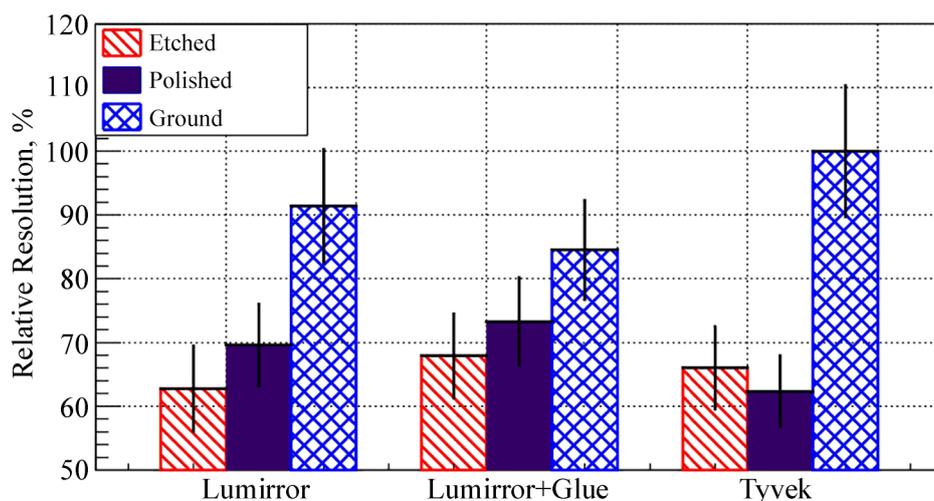


Рис. 5: Относительное энергетическое разрешение модуля в зависимости от отражателя и обработки поверхности кристалла.

обработки поверхности сцинтилляционного кристалла LFS-3, так как для этой комбинации получен максимальный световой выход фотоэлектронов и одно из лучших значений энергетического разрешения. Следует отметить, что химическая полировка является экономически выгодной по сравнению с использованием механической полировки поверхности кристаллического модуля ПЭТ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Xin Yang and Evan Downie, *Phys. Med. Biol.* **58**, 2143 (2013). DOI: 10.1088/0031-9155/58/7/2143.
- [2] Amir Chabrial, Daniel Franklin, and Habib Zaidi, *Physica Medica* **50**, 37 (2018). DOI: 10.1016/j.ejmp.2018.05.010.
- [3] Ю. Д. Заварцев, М. В. Завертяев, А. И. Загуменный и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(2), 13 (2013). DOI: 10.3103/S1068335613020024.
- [4] <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/type/S13360-3050VE/index.html>.
- [5] <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/generalities/index.html>.
- [6] Martin Janecek, *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **59**(3), 490 (2012). DOI: 10.1109/TNS.2012.2183385.
- [7] <https://root.cern/doc/master/release-notes.html>.

Поступила в редакцию 25 ноября 2020 г.

После доработки 29 апреля 2021 г.

Принята к публикации 30 апреля 2021 г.