

Изучение характеристик гамма-локатора с детектором на основе кристалла GAGG в сочетании с фотоприёмником SiPM

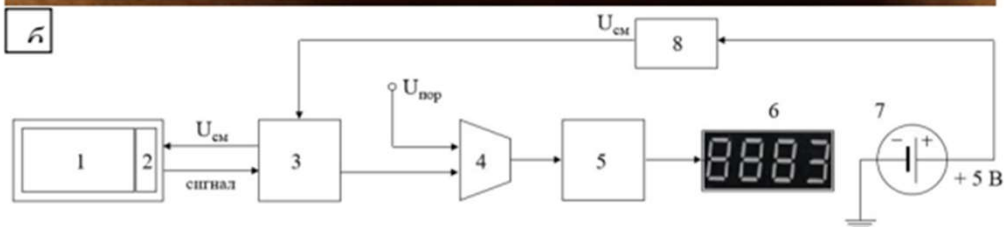
Научный руководитель: Дубинин Ф.А.

Студент: Зверев А.П.

Группа: Б19-102

Гамма-зонд для ядерной медицины

Гамма-зонд - прибор, позволяющий локализовать местоположение злокачественных образований в организме пациента (основное назначение).



- 1 – сцинтилляционный кристалл;
 - 2 – SiPM;
 - 3 – схема включения SiPM;
 - 4 – компаратор;
 - 5 – микроконтроллер;
 - 6 – цифровой дисплей;
 - 7 – источник питания;
 - 8 преобразователь напряжения
- $U_{см}$ - напряжение смещения SiPM
 $U_{пор}$ - пороговое напряжение компаратора

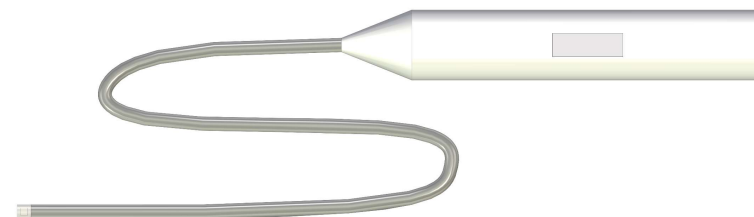
Цель: изучение характеристик детектора на основе кристалла GAGG в сочетании с фотоприёмником SiPM

Задачи:

1. Выбрать оптимальное отражающее покрытие для кристалла GAGG;
2. Оценить световыход кристалла GAGG при помощи SiPM;
3. Оценить ослабление пучка гамма-квантов сцинтиллятора GAGG;
4. Оценить координатное разрешение на основе детектора GAGG $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$ и SiPM.

Гамма-зонд с с вынесенным сенсором для эндоскопии:

- Минимальный диаметр – 4 мм;
- Хорошая чувствительность;
- Варьируемое поле зрения;
- Длина кабеля не влияет на производительность детектора.



Характеристики GAGG

Характеристики сцинтиллятора	NaI:Tl	LYSO:Ce	GAGG:Ce
Плотность, г/см ³	3,67	7,1	6,62
Энергетическое разрешение, %	7,5	7,1	7,4
Световыход, ф/МэВ	38	32	40
Длина волны излучения, нм	415	420	520
Время высвечивания, нс	230	50	92
Гигроскопичность	+	-	-
Наличие собственного фона	-	+	-

*GAGG обладает сравнительно хорошими характеристиками:

*Высокий световыход;

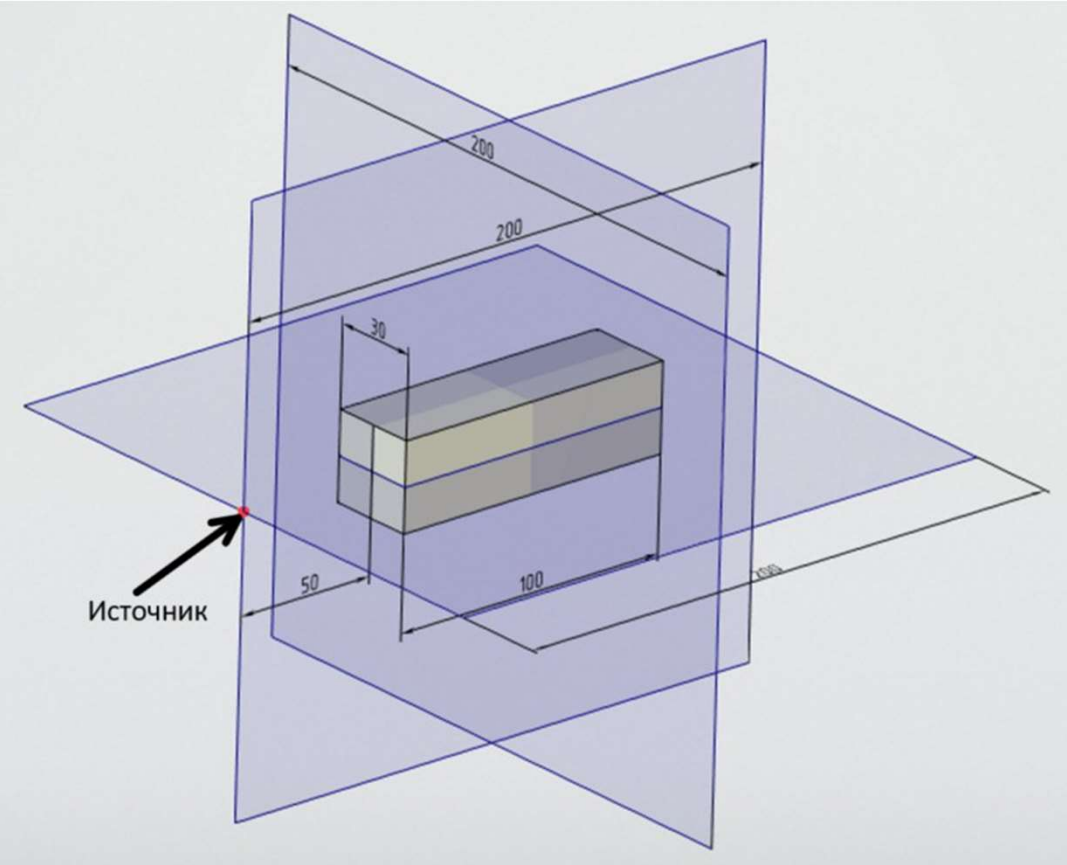
*Не гигроскопичен;

*Отсутствует собственный фон;

*Диапазон излучения находится в окрестности максимума эффективности регистрации SiPM.

*Есть доступ к изготовителю кристалла GAGG.

Ослабление пучка гамма-квантов сцинтиллятора GAGG



Модель создана в Geant4

Не было фотонов, разыгрывались только гамма-кванты

Источник: Tc-99m

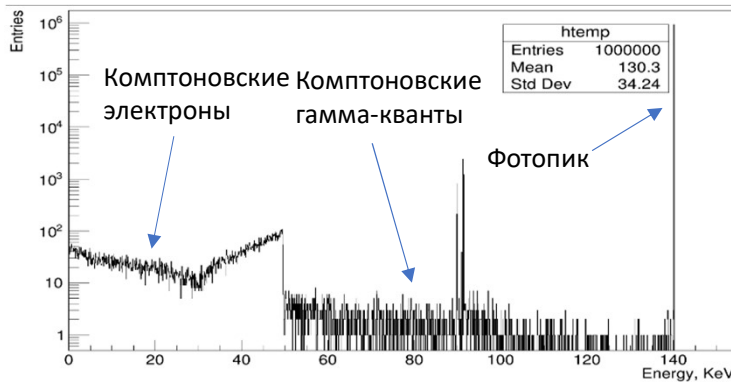
Энергия: 140 кэВ

Сцинтилляторы:

GAGG:Ce

LYSO:Ce

LaBr₃:Ce



GAGG:Ce

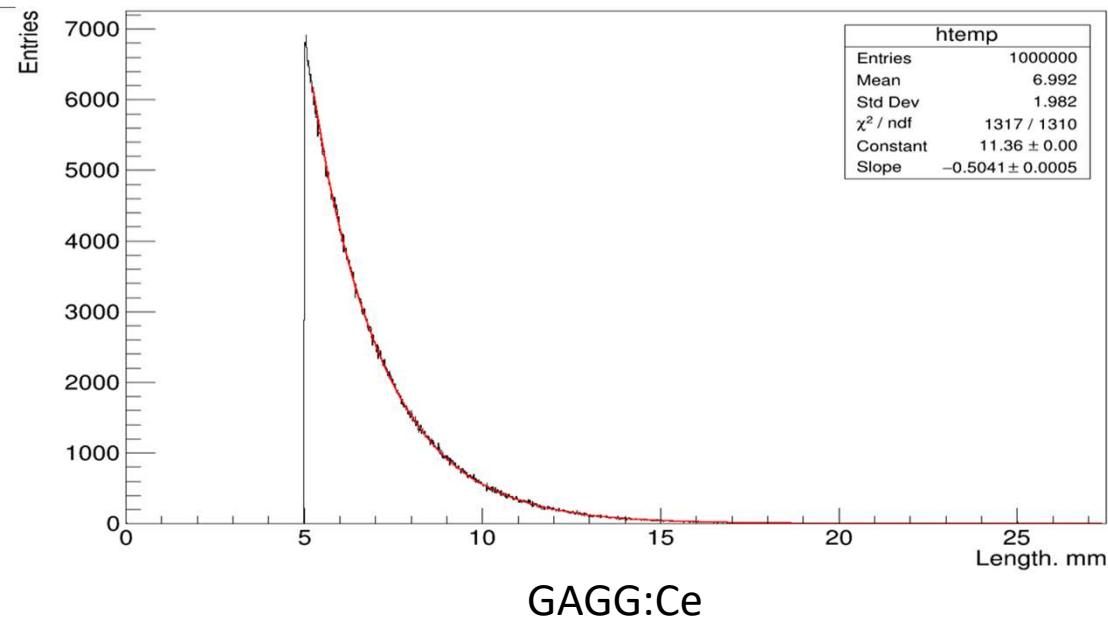
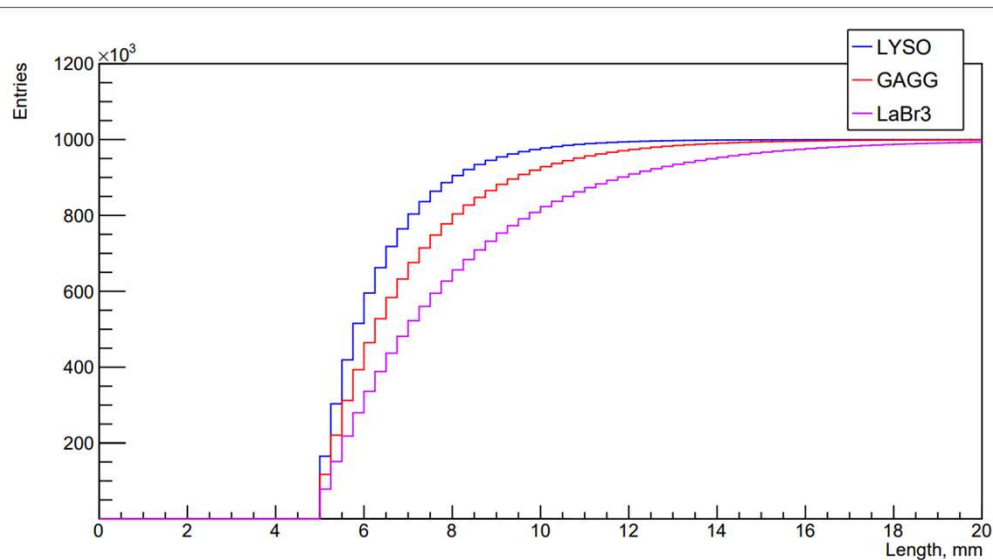
Среда: хим. состав соответствует воздуху;

Размеры рабочего объема: 20x20x20 мм³;

Число розыгрышей: 1 млн;

Анализ осуществлялся по области в окрестности 140 кэВ.

Результаты моделирования

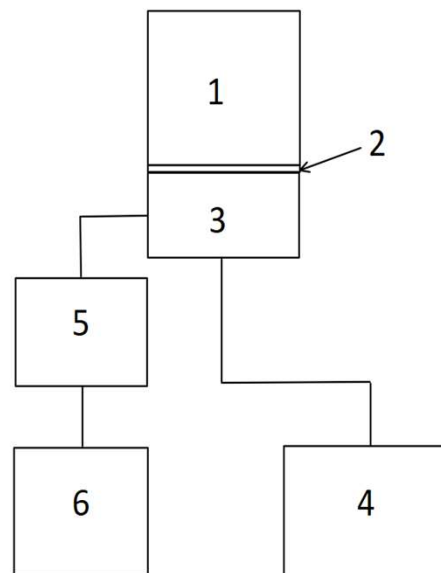
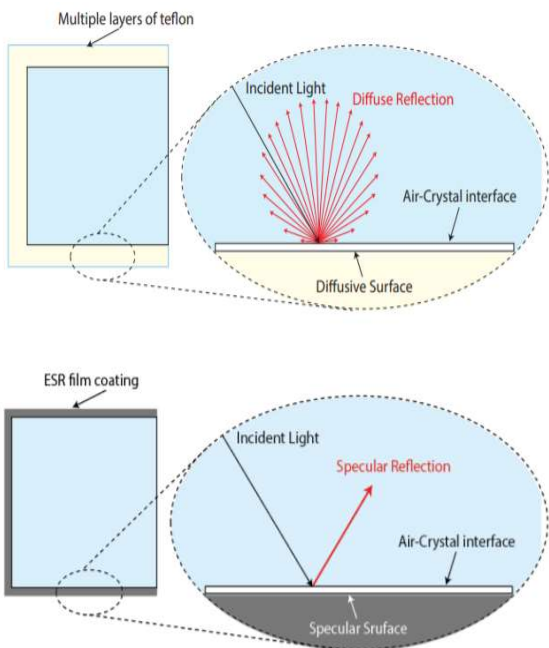


- 99% поглощение потока частиц наблюдается при значении толщины рабочего вещества:
- GAGG: 9mm
- LYSO: 5mm

Длина ослабления в e раз:

- GAGG: $1,984 \pm 0,002$ мм;
- LYSO: $1,374 \pm 0,002$ мм;
- LaBr₃: $3,002 \pm 0,004$ мм.

Выбор оптимального отражающего покрытия для сцинтиллятора GAGG



- 1 - сцинтиллятор (GAGG)
- 2 - оптическая смазка
- 3 - фотодетектор SensL SB 30020
- 4 - осциллограф Lecroy 620Zi
- 5 - мультиметр
- 6 - источник питания

- * Напряжение питания: 28.4 В
- * Источник: ^{137}Cs
- * Энергия излучения: 662 кэВ
- * Осциллограф использовался для получения спектров.

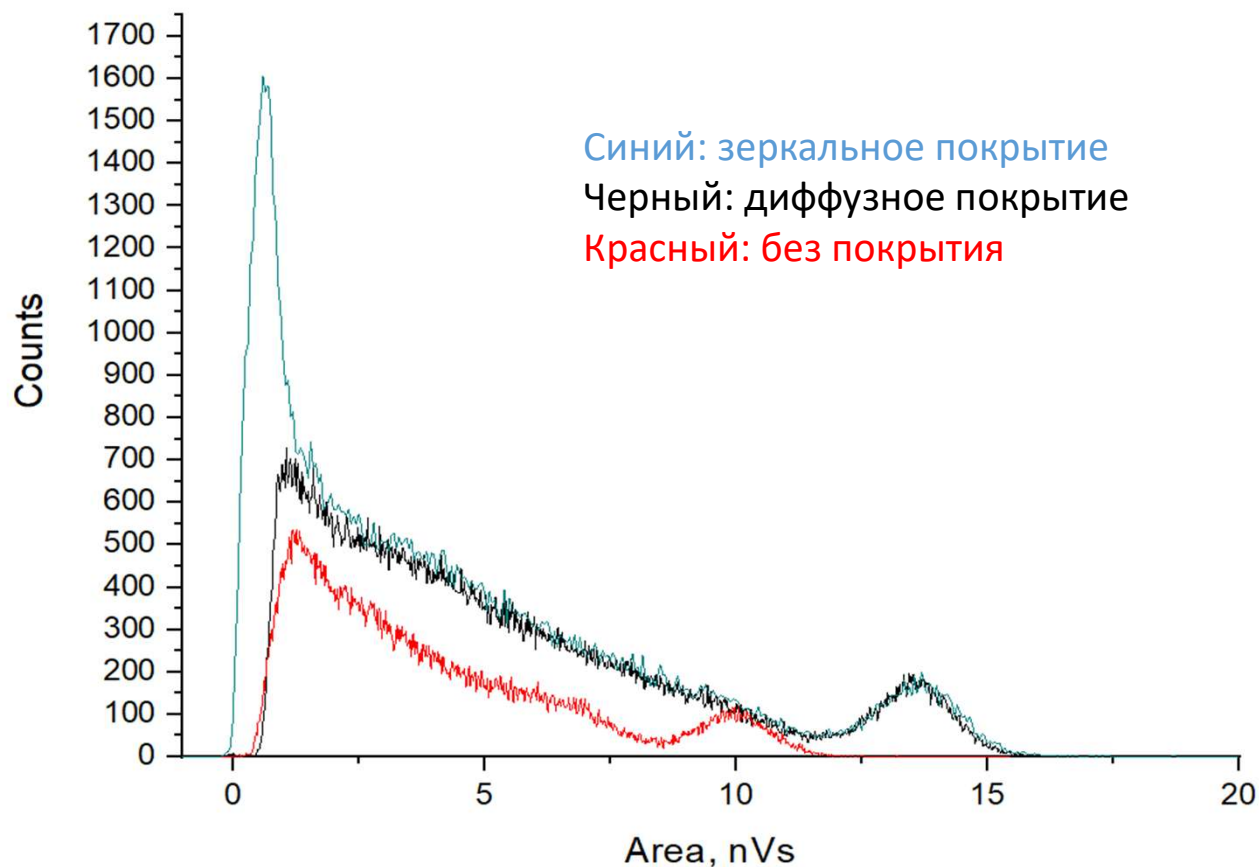
Средний коэффициент отражения:

- Зеркальной плёнки ~ 95%
- Тефлона ~ 95%

Характеристики SensL SB 30020

Фоточувствительная площадь	3 x 3 мм ²
Размер пикселя	20 x 20 мкм ²
Число пикселей	10998
Длина волны максимума чувствительности	420 нм
Эффективность регистрации	25%

Результаты определения лучшего светоотражающего покрытия



Тип покрытия	Положение максимума, нВс	Энергетическое разрешение, %
Зеркальное	13.56 ± 0.02	15
Диффузное	13.61 ± 0.01	14
-	9.90 ± 0.01	18

Температура варьировалась в пределах 1°C .
Объясняет различие между зеркальным и диффузным покрытиями.

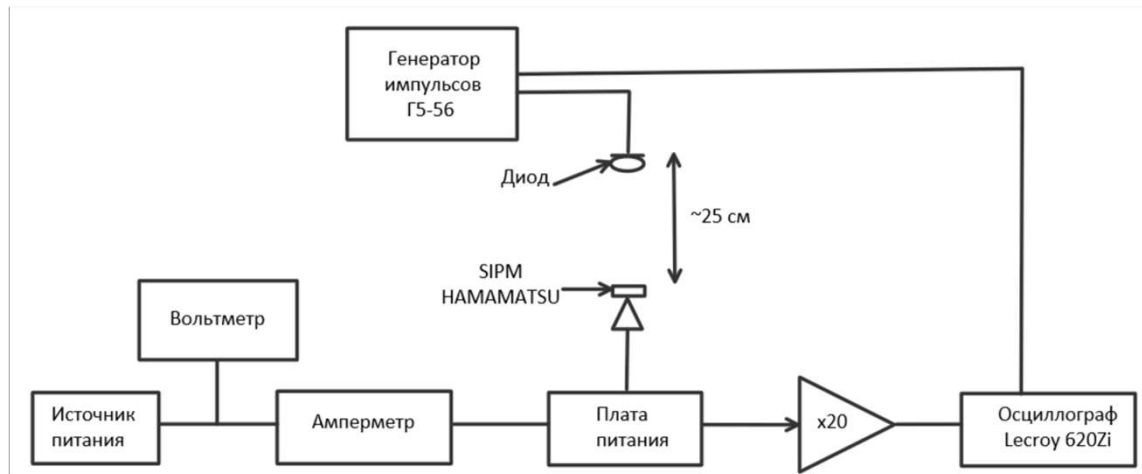
Вывод: зеркальное и диффузное покрытия показывают себя одинаково эффективными в случае их применения в сцинтилляционном детекторе.

Методика измерения световыхода

1. Определение коэффициента усиления SiPM:
измерение одноэлектронного спектра;
2. Измерение спектров с кристаллом GAGG:Ce без
отражателя;
3. Расчёт световыхода.

$$\frac{N_{\text{упавш}}^{ph}}{N_{\text{изл}}^{ph}} = \delta_{\text{photon}} - ?$$

Измерение одноэлектронного спектра



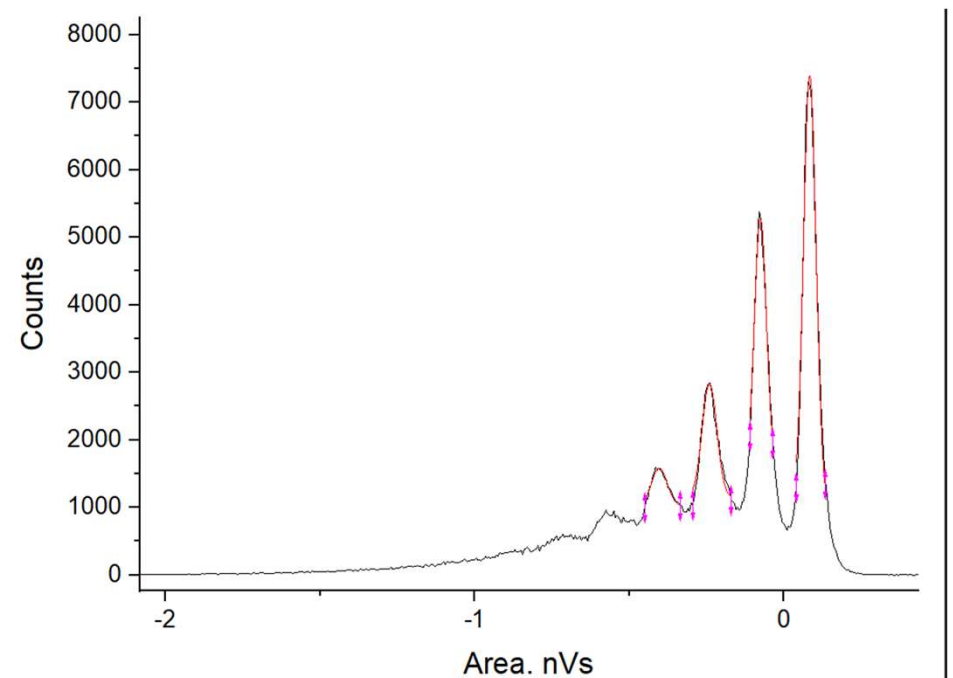
SiPM: HAMAMATSU S109312-025P

Число ячеек SiPM: 14400

Напряжение питания 72.8 В

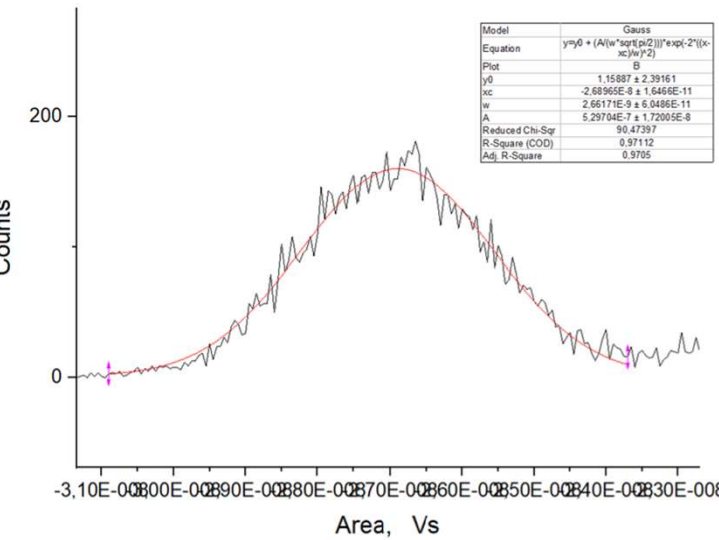
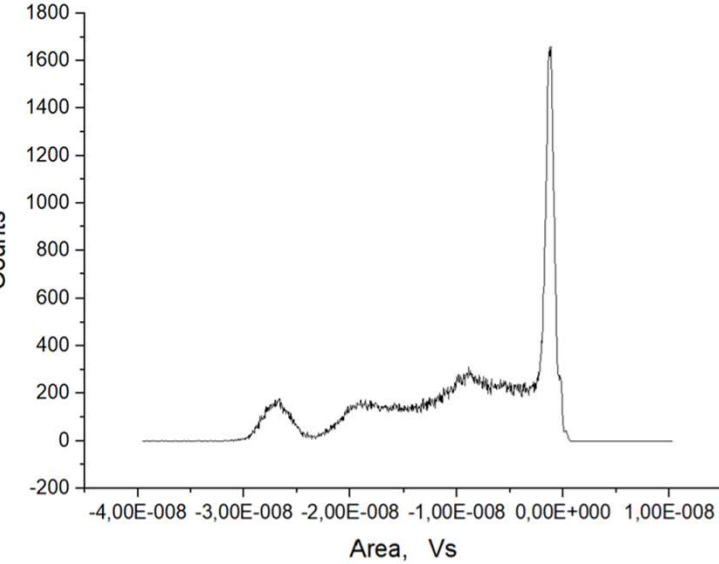
Ток ≈ 0.39 мкА

Длительность импульса от генератора $\tau = 10$ ns

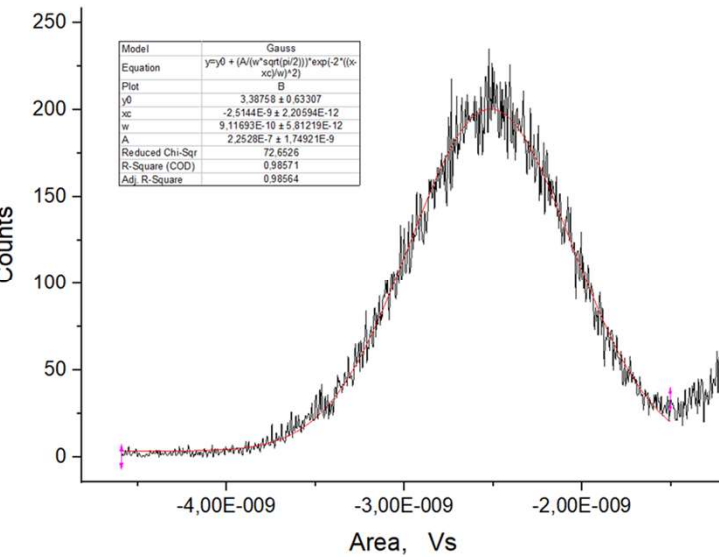
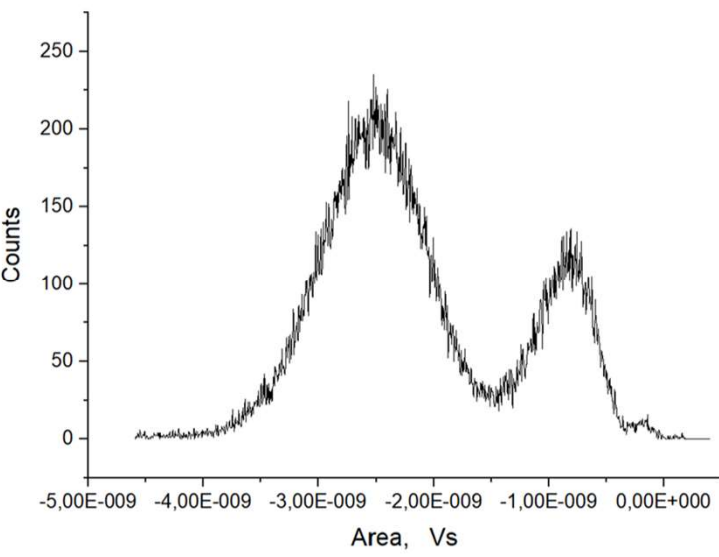


$A_0 - A_1 = (1,60 \pm 0,04) * 10^{-10}$ В*с – площадь под кривой сигнала от одной ячейки

Измерение спектров с кристаллом GAGG:Ce без отражателя

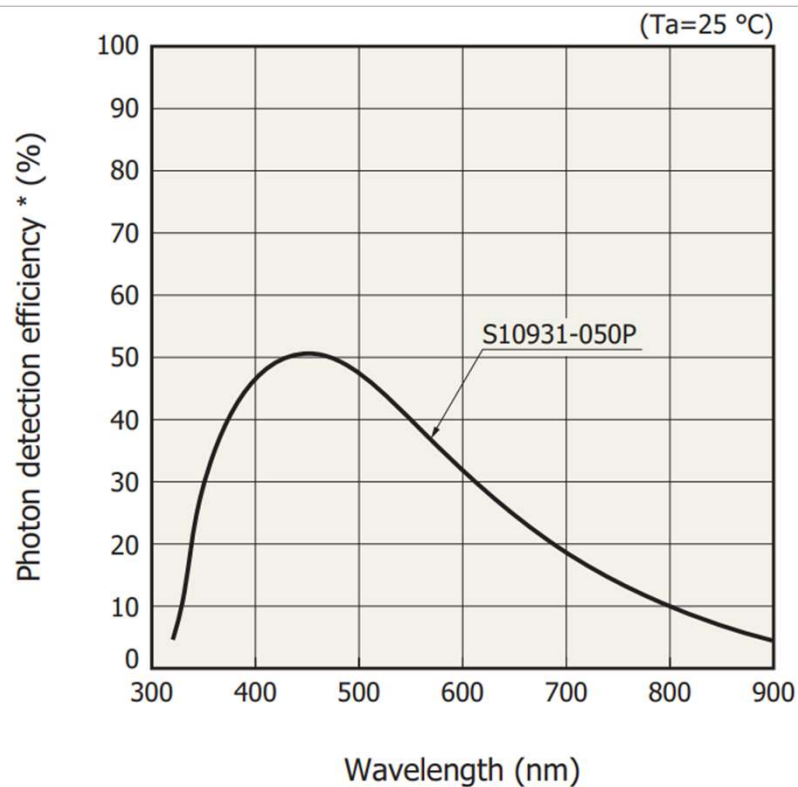


¹³⁷Cs:
 $\chi_c = (-26,90 \pm 0,02) \text{ нВ*с}$
 Число сработавших ячеек: 3377



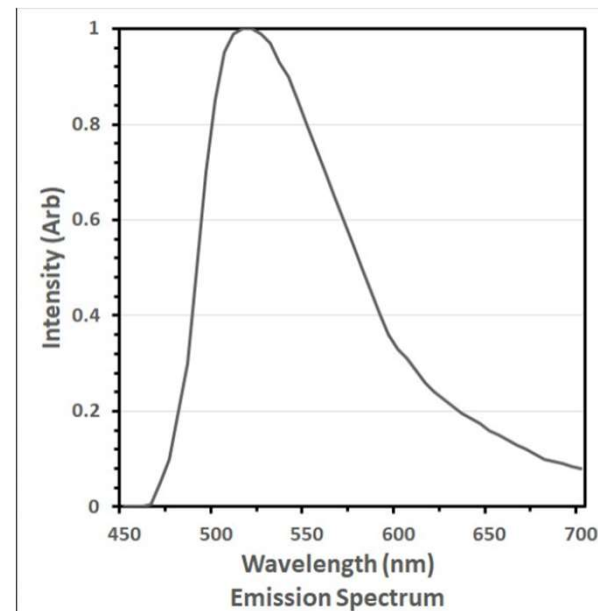
²⁴¹Am:
 $\chi_c = (-2,514 \pm 0,002) \text{ нВ*с}$
 Число сработавших ячеек: 332

Определение эффективности регистрации



* Photon detection efficiency includes effects of crosstalk and afterpulses.

$$\lambda_{GAGG:Ce}^{max} = 520 \text{ nm}$$
$$K_{eff} \approx 45\%$$

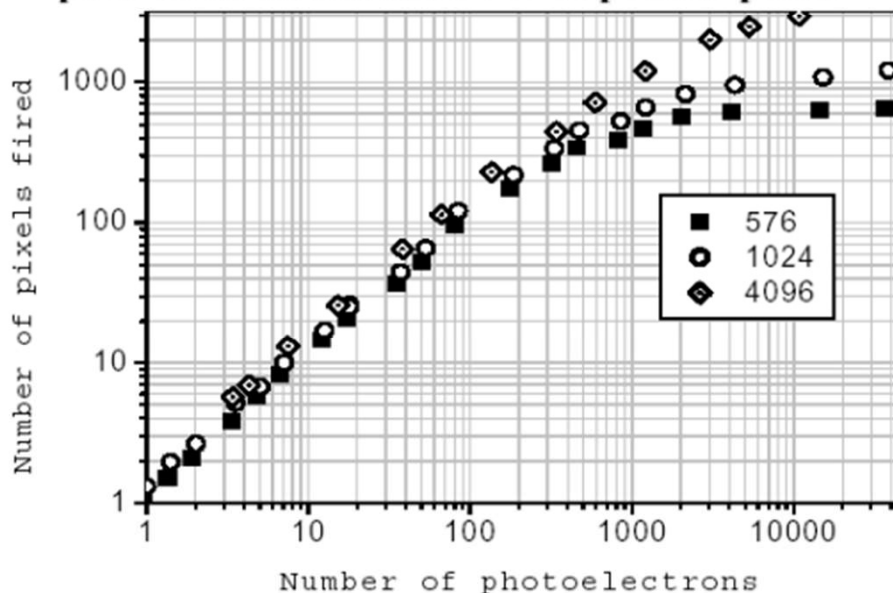


Оценка световыхода GAGG:Ce

$$N = \frac{X_c^{\text{ист}} - X_{c_p}^{\text{ист}}}{A_1 - A_0} * K_{\text{усил}}$$

$$N_{\text{firedcells}} = N_{\text{total}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{N_{\text{photon}} \cdot PDE}{N_{\text{total}}}}\right)$$

Response functions for the SiPMs with different total pixel numbers measured for 40 ps laser pulses



Yu.Musienko Recent Progress and Perspectives in Solid State Photomultipliers Detector Seminar, CERN, 30.06.2017.

$$\mathcal{L} = \frac{N_{\text{photon}}}{\mathcal{E}_{\text{ист}} \cdot \delta_{\text{photon}}}$$

$$\delta_{\text{photon}} \approx 20\%$$

$$N_{\text{photon}}^{Cs} = 8551 \quad \mathcal{E}^{Cs} = 662 \text{ кэВ}$$

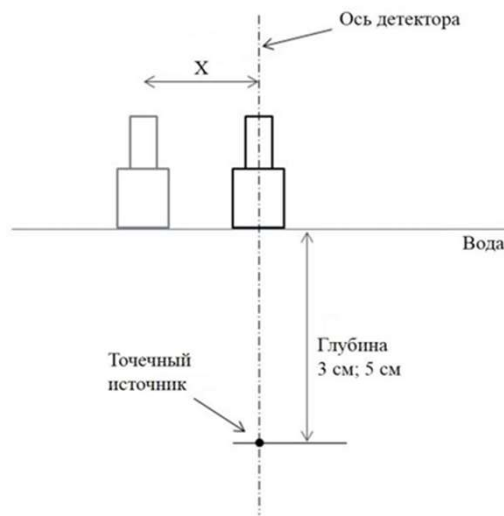
$$N_{\text{photon}}^{Am} = 744 \quad \mathcal{E}^{Am} = 60 \text{ кэВ}$$

$$\mathcal{L} \approx \frac{60 \text{ тыс. фотонов}}{\text{МэВ}}$$

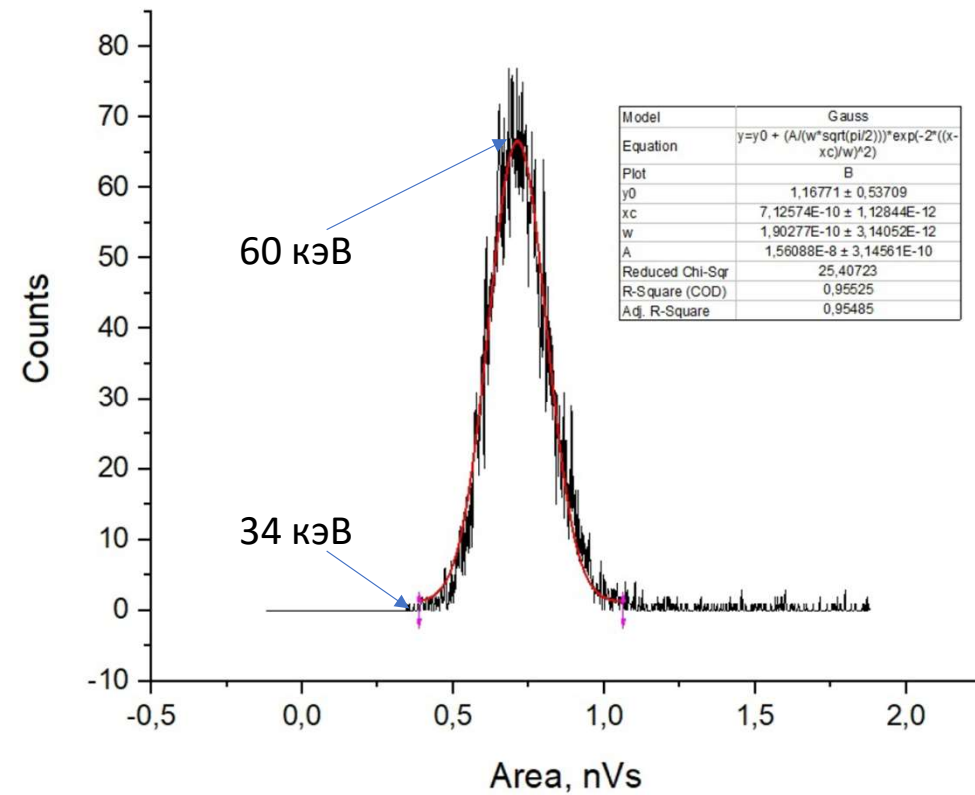
Методика определения координатного разрешения – выставление порога

- Энергия излучения ^{241}Am = 60 кэВ;
- Порог был выставлен по значению энергии 34 кэВ (под фотопиком);
- Время измерения: 100 сек;
- Источник находился на расстоянии 30 мм;

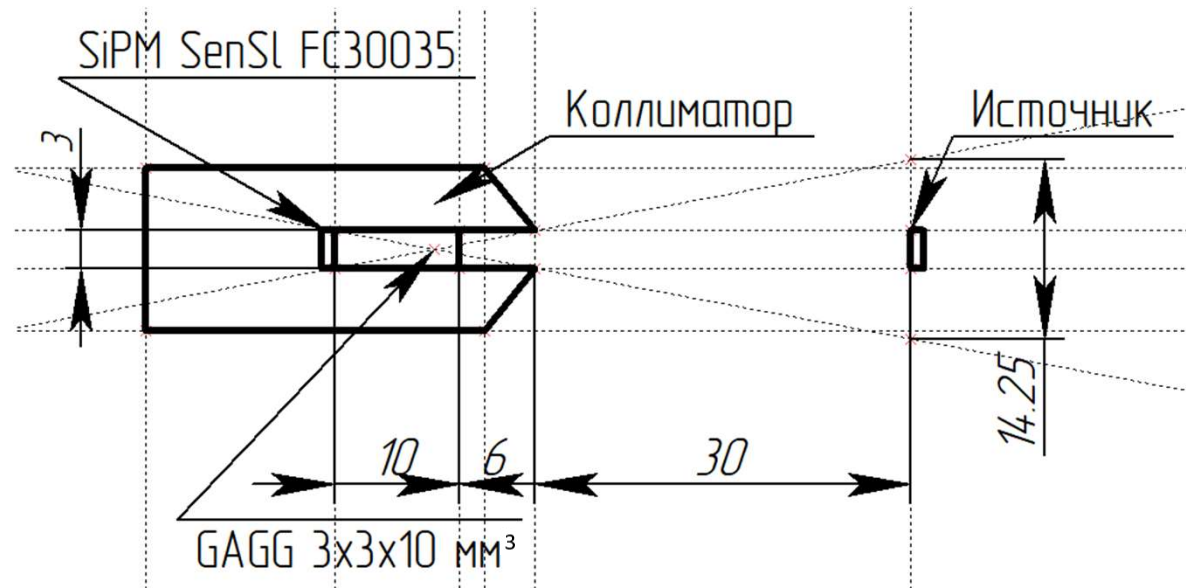
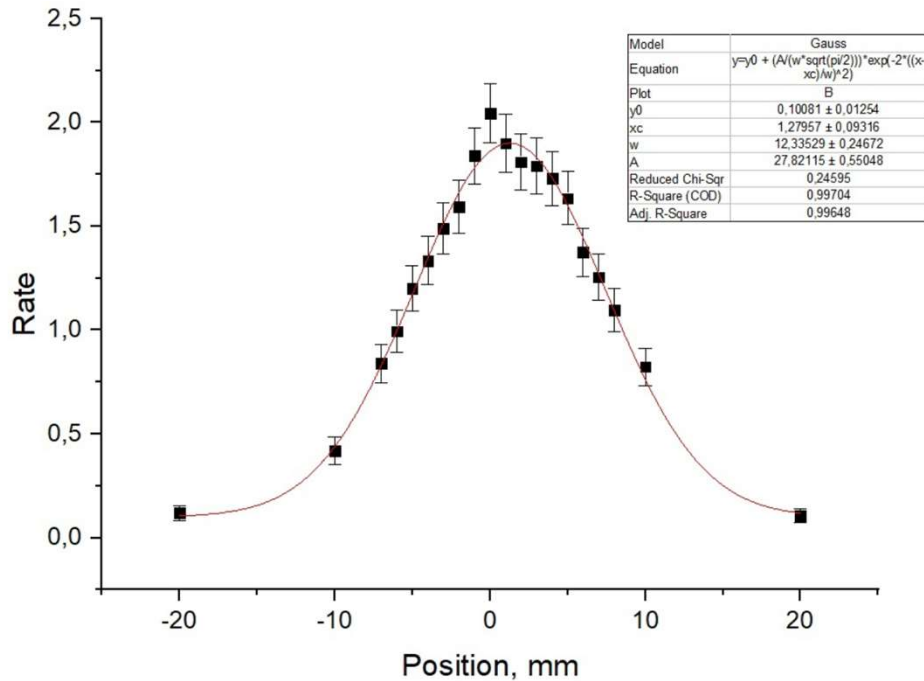
Производилось перемещение источника с шагом 1 мм.



Энергетический спектр ^{241}Am с выставленным порогом 34 кэВ



Координатное разрешение



$$\Delta = 14,0 \pm 0,3 \text{ мм}$$

Соотносится со значением, полученным из геометрической оптики.

Заключение

Длина ослабления в е раз для энергии 140 кэВ:

$$\lambda_e^{GAGG:Ce} = 1,984 \pm 0,002 \text{ мм.}$$

Световыход GAGG (Число сработавших ячеек, источник ^{137}Cs : 3377):

$$\mathcal{L} \approx \frac{60 \text{ тыс. фотонов}}{\text{МэВ}}.$$

Координатное разрешение:

$$\Delta = 14,0 \pm 0,3 \text{ мм.}$$

Для гамма-локатора со сцинтиллятором GAGG необходимо использовать кристалл $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$. 10 мм – оптимальная толщина. Лучший вариант покрытия для сцинтилляционного детектора - диффузное, поскольку диффузное покрытие проще в применении. Координатное разрешение, в первом приближении, описывается геометрической оптикой. GAGG имеет хороший световыход, что было подтверждено. В установке не требуется применение усилителя.

Список литературы

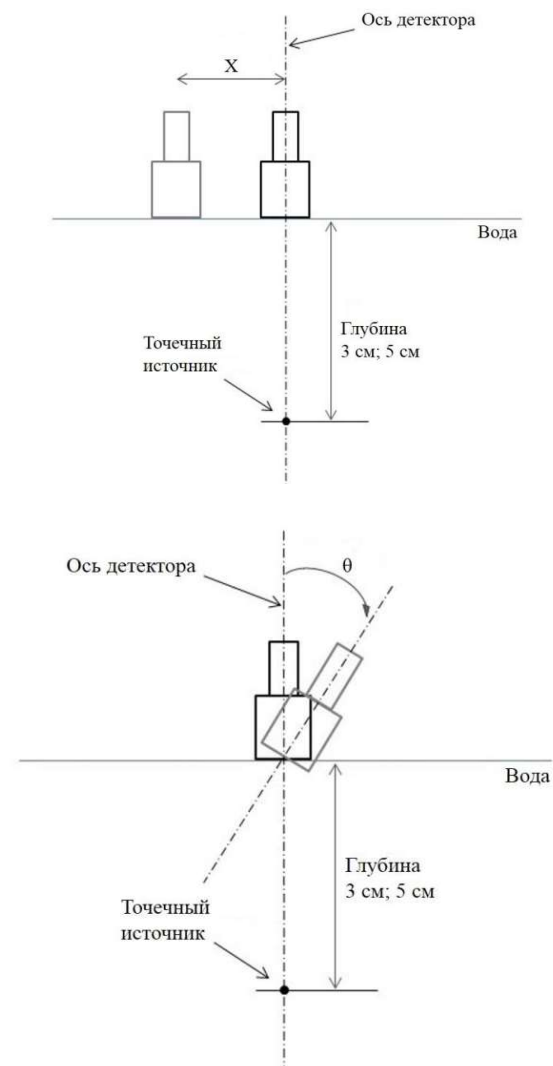
- [1] Ягнюкова А.К., Болоздыня А.И., Канцеров В.А., Сосновцев В.В. ГАММА-ЛОКАТОР ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ. Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии, ИСМАРТ-2014.
- [2] Н.Н. Чернов, А.В. Дьяков. ИССЛЕДОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ТОЧЕЧНОЙ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАЦИОННОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА. Известия ЮФУ, 2009.
- [3] Paolo Dell'Oglio a,b,c,d, Philippa Meershoek a,c, Tobias Maurer e, Esther M.K. Wit c, Pim J. van Leeuwen c, Henk G. van der Poel c, Fijs W.B. van Leeuwen a,b,c, Matthias N. van Oosterom a,c,. A DROP-IN Gamma Probe for Robot-assisted Radioguided Surgery of Lymph Nodes During Radical Prostatectomy. Accepted October 22, 2020
- [4] V. N. Potapov, N. K. Kononov, O. P. Ivanov, S. M. Ignatov, V. E. Stepanov, A.V. Chesnokov, and V. G. Volkov. A Gamma Locator for Remote Radioactivity Mapping and Dose Rate Control. Published in: IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science, 2004.
- [5] Бердникова А. К. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-ЗОНД ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ. Москва – 2016.
- [6] А.С.Симутин, М.Ю.Чернов, А.А.Гасанов, А.Д.Орлов, Н.В.Классен, С.З.Шмурак Исследование характеристик спектрометрического детектора на основе кристалла LaBr₃:Ce и ФЭУ-184, 2012.
- [7] Samaneh Azargoshasb, Simon van Alphen, Leon J. Slof, Giuseppe Rosiello, Stefano Puliatti, Sven I. van Leeuwen, Krijn M. Houwing¹, Michael Boonekamp, Jeroen Verhart, Paolo Dell'Oglio, Jos van der Hage, Matthias N. van Oosterom, Fijs W. B. van Leeuwen. The Click-On gamma probe, a second-generation tethered robotic gamma probe that improves dexterity and surgical decision-making, 2021 May 25.
- [8] Ilse G. T. Baeten , Jacob P. Hoogendam, Arthur J. A. T. Braat, Ronald P. Zweemer¹ and Cornelis G. Gerestein. Feasibility of a drop-in γ -probe for radioguided sentinel lymph detection in early-stage cervical cancer, 20 June 2022.
- [9] Deepti Sharma, George Koshy, Sonal Grover, Bhushan Sharma. Sentinel Lymph Node Biopsy. A new approach in the management of head and neck cancers, Sultan Qaboos University Med J, February 2017.
- [10] Aram Radnia, Hamed Abdollahzadeh, Behnoosh Teimourian, Mohammad Hossein Farahani, Mohammad Reza Ay. Introducing the GammaPen: All-in-One Gamma Probe for Sentinel Lymph Node Biopsy. 20 February 2021.
- [11] Jean-Marc Classe, Maryse Fiche, Caroline Rousseau, MD, Christine Sagan, François Dravet, Raphaelle Pioud, Albert Lisbona, Ludovic Ferrer, Loic Champion, Isabelle Resche, Chantal Curtet. Prospective Comparison of 3 γ -Probes for Sentinel Lymph Node Detection in 200 Breast Cancer Patients. March 2005.
- [12] Aram Radnia, Hamed Abdollahzadeh, Behnoosh Teimourian, Mohammad Hossein Farahani, Mohammad Esmaeil Akbari, Habib Zaidi, Mohammad Reza Ay. Development and characterization of an all-in-one gamma probe with auto-peak detection for sentinel lymph node biopsy based on NEMA NU3-2004 standard. 19 January 2021.
- [13] T. Furuno, A. Koshikawa, T. Kawabata, M. Itoh, S. Kurosawa, T. Morimoto, M. Murata, K. Sakanashi, M. Tsumura, A. Yamaji. Response of the GAGG(Ce) scintillator to charged particles compared with the CsI(Tl) scintillator. 13 October 2021.
- [14] Ching-Chia Li, Bor-Shing Lin, Sheng-Chen Wen, Yuan-Teng Liang, Hung-Yu Sung, Jhen-Hao Jhan, Bor-Shyh. Smart Blood Vessel Detection System for Laparoscopic Surgery. Published online 2022 Mar 11.
- [15] Adrian Calborean, Sergiu Macavei, Mihaela Mocan, Catalin Ciuce, Adriana Bintintan, Adrian Cordos, Cosmin Pestean, Romeo Chira, Liviu Zarbo, Lucian Barbu-Tudoran, George Dindelegan, Felix Nicke, Bogdan Mocan, Valeriu Surlin, Vasile Bintintan. Non-invasive laparoscopic detection of small tumors of the digestive tract using inductive sensors of proximity. 2022.

Основные характеристики прибора

Чувствительность – количество зарегистрированных в секунду гамма-квантов, отнесённое к единице активности гамма-источника.

Пространственное разрешение – полная ширина на половине высоты (FWHM) координатного распределения скорости счёта гамма-зонда вдоль оси, перпендикулярной оси симметрии гамма-зонда.

Пространственная селективность - полная ширина на половине высоты (FWHM) углового распределения скорости счёта гамма-зонда (варьируется угол наклона гамма-зонда относительно прямой, соединяющей источник гамма-квантов и центр входного окна детектора).



Сравнение характеристик гамма-зондов

	Гамма-локатор	Gamma Pen
Параметры детектора	LaBr ₃ :Ce + SiPM	CsI:Tl + SiPM
Тест по стандарту NEMA NU3-2004, расстояние до источника 30 мм		
	Вода/воздух	Вода/воздух
Чувствительность, (имп/с)/МБк	653/1074	3050/3500
Координатное разрешение, мм	20,3/17,8	87/77
Координатная селективность, град	26,6/19,1	47/40



Gamma Pen [10]

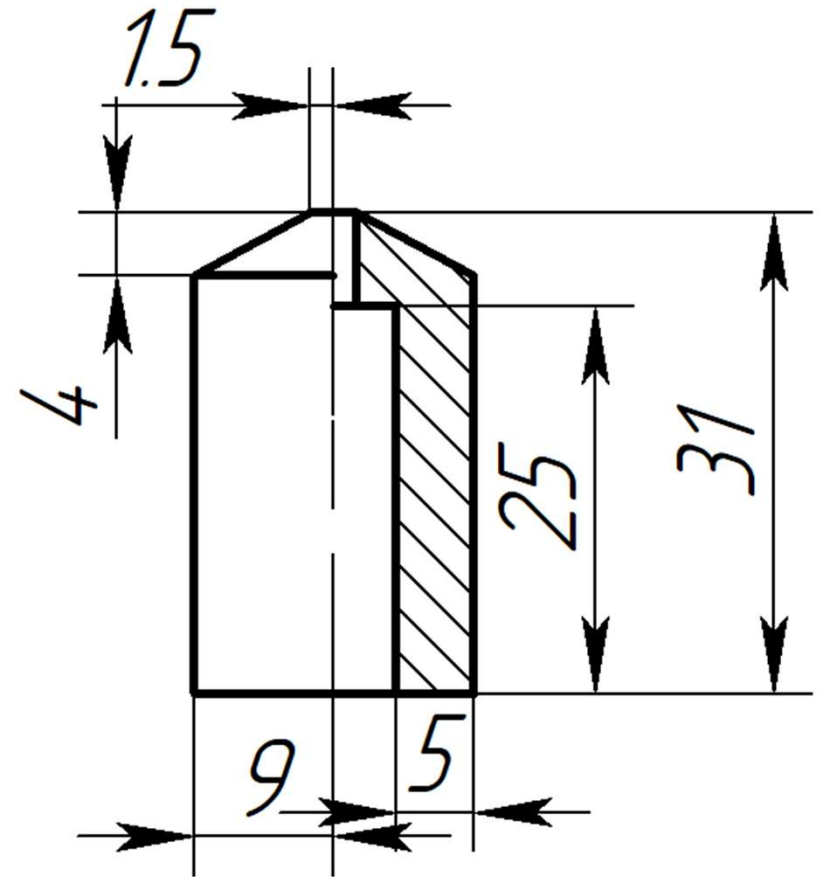
Преимущества в чувствительности:
Gamma Pen
Преимущества в разрешении / селективности:
Гамма-локатор



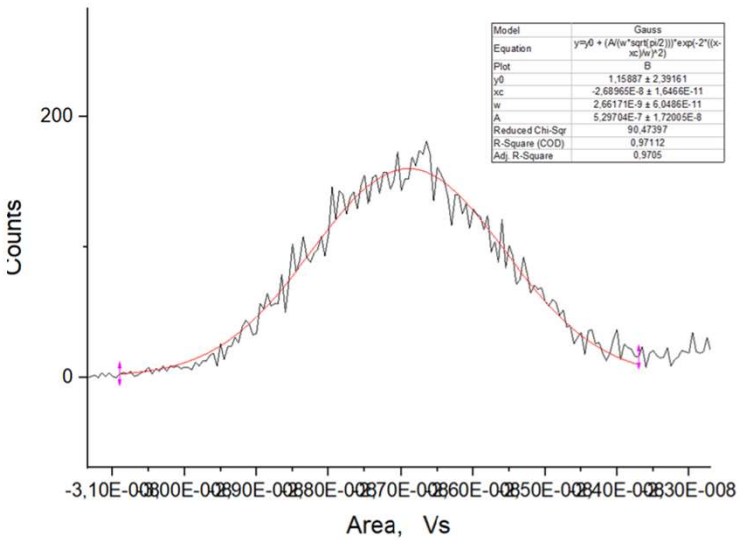
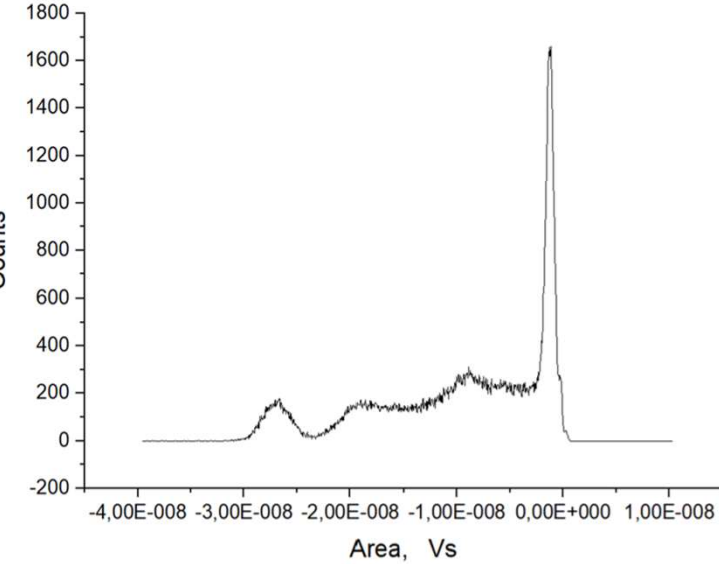
Гамма-локатор [5]

Коллиматор

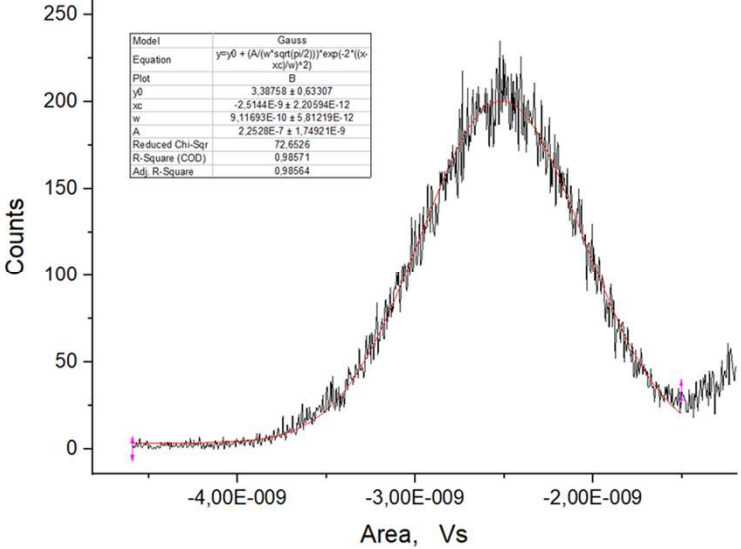
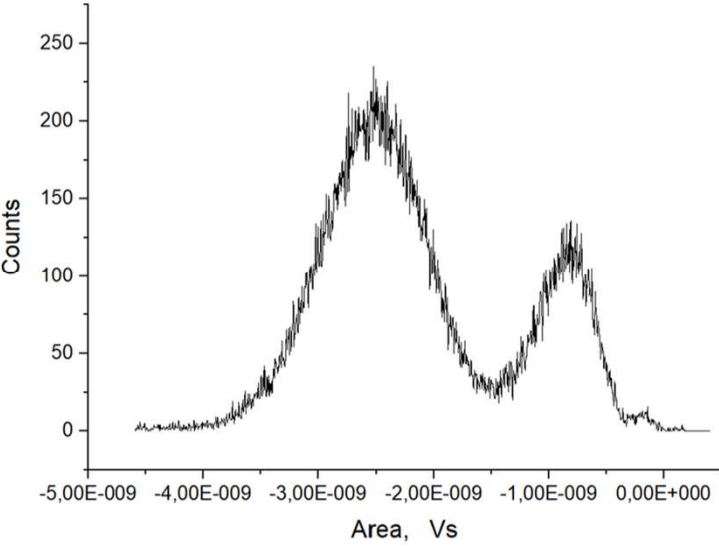
- Эскиз коллиматора:
- Отверстие коллиматора – 3 мм;
- Толщина передней стенки – 6 мм;
- Материал: Pb



Измерение спектров с кристаллом GAGG:Ce без отражателя



¹³⁷Cs:
 $\chi_c = (-26,90 \pm 0,02) \text{ нВ*с}$
 Число сработавших ячеек: 3377
 Энергетическое разрешение: 12%



²⁴¹Am:
 $\chi_c = (-2,514 \pm 0,002) \text{ нВ*с}$
 Число сработавших ячеек: 332
 Энергетическое разрешение: 43%