

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А. А. Александров, И. Ю. Дроздов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭ», г. Саров Нижегородской обл.

В связи с развитием в атомной отрасли моделирования полупроводниковых детекторов (ППД) появилась необходимость в более точных расчётах по верификации детектора.

Аналогичная работа с более грубыми расчётами по верификации ППД из особо чистого германия проводилась в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2009 г.

Детектор, входящий в состав радиометрической установки, после проведения ремонтных работ вновь был включён в состав установки.

Данный детектор используется для определения активационных интегралов, которые рассчитываются по измеренной активности образцов в калибровочной геометрии. Вследствие того, что измерения активности ОСГИ (образцовых спектрометрических гамма-источников) в калибровочной геометрии отличаются от измерений активности образцов в рабочей геометрии, для корректного определения активационных интегралов в рамках нейтронно-активационного метода вводятся поправки на отличие калибровочной геометрии «ОСГИ – детектор» от типичной геометрии измерения «диск – детектор» при определении чувствительности детектора к гамма-излучению образцов.

С целью подтверждения рабочих характеристик детектора требовалось провести калибровочные измерения чувствительности детектора к гамма-излучению различных энергий в трёх вариантах геометрии «источник – детектор», а также провести расчётное сопровождение этих работ. Для проведения калибровочных измерений используются ОСГИ.

Учитывая, что рабочие измерения на установке проводятся с дисковыми источниками гамма-излучения, требуется вводить поправки на отличие калибровочной геометрии «ОСГИ – детектор» от типичной геометрии измерения «диск – детектор».

С целью расчёта поправок на отличие калибровочной геометрии измерений от рабочей геометрии создавалась расчётная модель полупроводникового детектора.

Наиболее полно учесть весь комплекс факторов, влияющих на величину вышеуказанных поправок, можно, используя расчёт по методу Монте-Карло.

В данной работе расчёты проводились по методу Монте-Карло, реализованному в алгоритмах программы Tart [1].

1. Расчётная модель

Для реализации возможности сканирования объёма детектора в разных направлениях было выбрано три варианта геометрии измерений «источник – детектор» с использованием коллимированного пучка гамма-квантов. При тестовых измерениях использовались нуклиды из набора ОСГИ-3.

Использование гамма-квантов с различными энергиями позволяет сканировать не только рабочий объём детектора, но и элементы конструкции вокруг него. Таким образом, о размерах кристалла, толщине «мёртвого слоя», толщине стенок корпуса детектора и т. д. можно судить по степени поглощения гамма-излучения в кристалле и элементах конструкции детектора, т. е., по чувствительности детектора к гамма-излучению различных энергий.

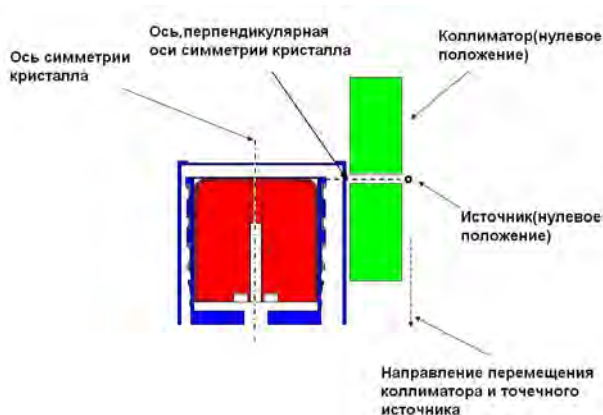


Рис. 1. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 1)

Далее рассмотрены три варианта геометрии измерений «ОСГИ – детектор».

Вариант 1. Источник располагался на оси симметрии кристалла на расстоянии 2 мм от боковой поверхности корпуса детектора (см. рис. 1). Источник размещался за коллимационным отверстием диаметром 4,45 мм. Источник перемещался (одновременно с коллиматором) в вертикальном направлении с шагом 0,5 см. Чувствительность определялась в 12 позициях для энергий: 59,537 кэВ (^{241}Am), 356,017 кэВ (^{133}Ba), 661,662 кэВ (^{137}Cs), 1173,23 и 1332,5 кэВ (^{60}Co), 122,06 кэВ (^{57}Co). В этом варианте с помощью гамма-квантов различных энергий сканируется рас-

положение центральной выемки кристалла и её высота и диаметр. «Работает» объём кристалла, ограниченный узким телесным углом.

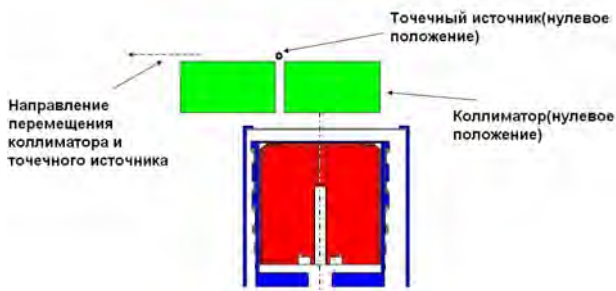


Рис. 2. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 2)

Вариант 2. Источник располагался на оси, параллельной оси симметрии кристалла, на расстоянии 8 мм от торцевой поверхности корпуса детектора (см. рис. 2). Источник перемещался по этой оси. Чувствительность определялась в 11 точках для энергий: 59,537кэВ (^{241}Am), 356,017кэВ (^{133}Ba), 661,662 кэВ (^{137}Cs), 1173,23 и 1332,5 кэВ (^{60}Co), 122,06 кэВ (^{57}Co). В этом варианте с помощью гамма-квантов различных энергий сканируется объём центральной выемки кристалла и её диаметр. «Работает» объём кристалла, ограниченный узким телесным углом.

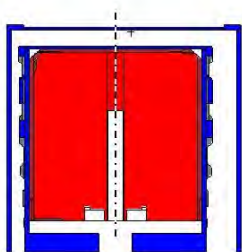


Рис. 3. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 3)

Вариант 3. Источник располагался на оси, параллельной оси симметрии кристалла, на расстоянии 10 см от торцевой поверхности корпуса детектора (см. рис. 3). Чувствительность определялась в нулевом положении для энергий: 59,537кэВ (^{241}Am), 356,017 кэВ (^{133}Ba), 661,662 кэВ (^{137}Cs), 1173,23 и

1332,5 кэВ (^{60}Co), 122,06 кэВ (^{57}Co). «Работает» весь объём кристалла.

В активационных измерениях на реакторных установках ИЯРФ наиболее часто используются активационные детекторы в виде дисков диаметрами от 10 до 65 мм и толщиной 1 мм.

После проведения облучательных экспериментов в дисках появляется наведённая активность, и они становятся источниками гамма-излучения. Обладая заметными размерами, диски отличаются от точечных источников ОСГИ-3, и при измерении их наведённой активности требуется вводить поправки на самопоглощение и отличие их геометрии от геометрии точечных источников.

В табл. 1 представлена информация о размерах и материальном составе коллиматора.

Таблица 1

Размеры и материальный состав коллиматора

Высота, см	2,54
Длина, см	10
Диаметр центрального отверстия, см	0,445
Ширина, см	10
Материал	Pb – 100 %

Для определения поправок наиболее удобно использовать расчёт по методу Монте-Карло, в котором учитывается многократное рассеяние гамма-квантов в материале источника и попадание гамма-излучения в объём детектора реальной (не идеальной) конфигурации. Однако, результаты такого расчёта могут быть признанными удовлетворительными только при наличии верифицированной расчётной модели детектора. Верификация расчётной модели проводится в серии отдельных тестовых измерений.

На рис. 4–6 представлена 3D-геометрия проведения тестовых измерений.

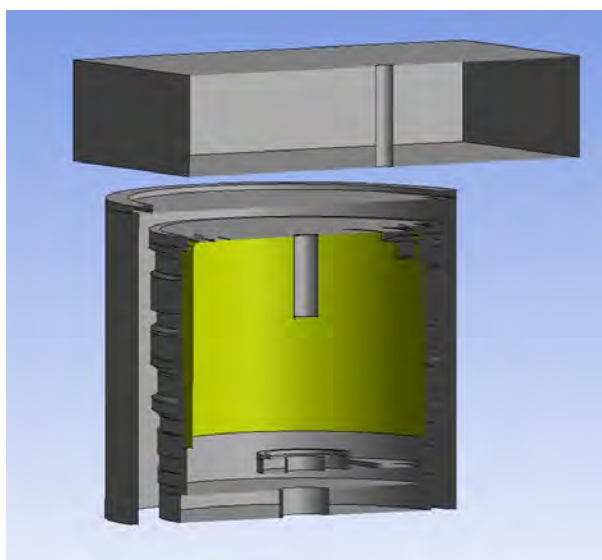


Рис. 4. 3D модель детектора в осевом разрезе для варианта «коллиматор над детектором»

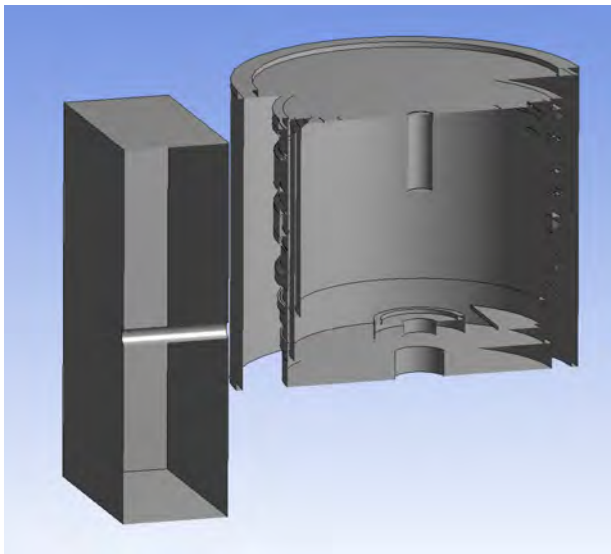


Рис. 5. 3D модель детектора в осевом разрезе для варианта «коллиматор сбоку от детектора»

Для варианта геометрии, представленного на рис. 6, точечный источник размещался на расстоянии 10 см от детектора.

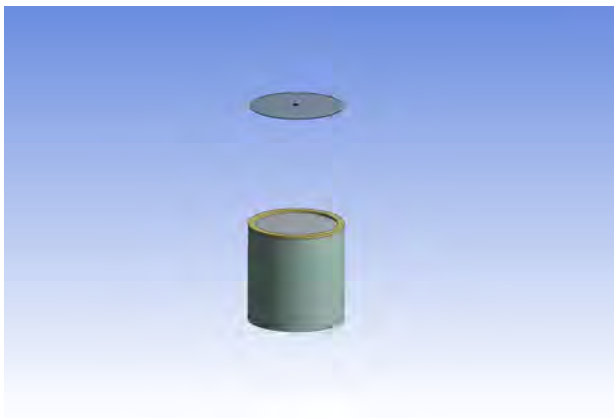


Рис. 6. 3D модель детектора для варианта «без коллиматора» с точечным источником

2. Сравнение результатов измерений и расчёта по модели

В данном разделе приводится сравнение результатов измерений и расчёта по модели для трёх вариантов геометрии «источник – детектор». Далее рассчитывается степень согласия расчётных и экспериментальных данных по модели.

На рис. 7–9 представлены кривые чувствительности детектора для варианта геометрии 1.

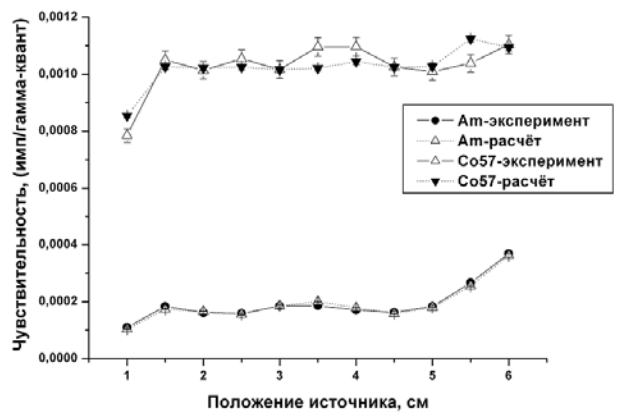


Рис. 7. Кривые чувствительности детектора для ^{241}Am и ^{57}Co для варианта геометрии 1

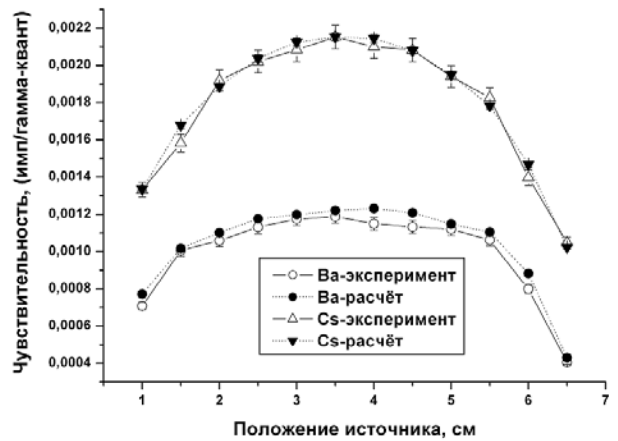


Рис. 8. Кривые чувствительности детектора для ^{133}Ba и ^{137}Cs для варианта геометрии 1

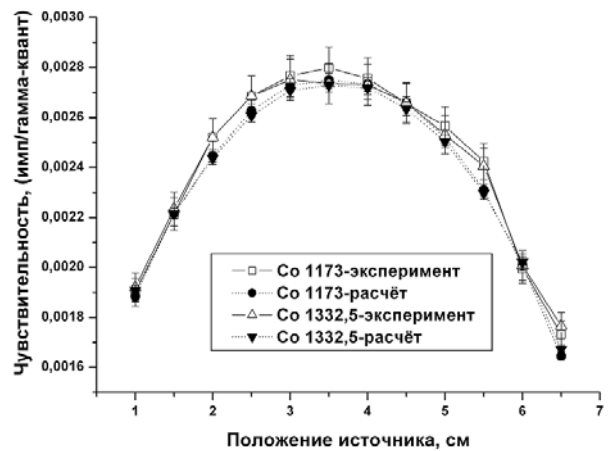


Рис. 9. Кривые чувствительности детектора для ^{60}Co с энергиями 1173,23 кэВ и 1332,5 кэВ для варианта геометрии 1

На рис. 10–12 представлены кривые чувствительности детектора для варианта геометрии 2.

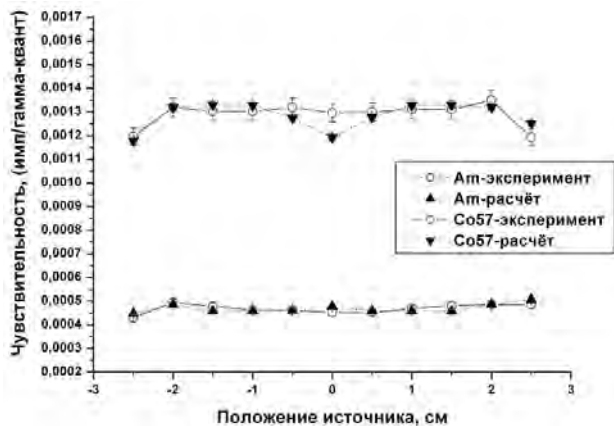


Рис. 10. Кривые чувствительности детектора для ^{241}Am и ^{57}Co для варианта геометрии 2

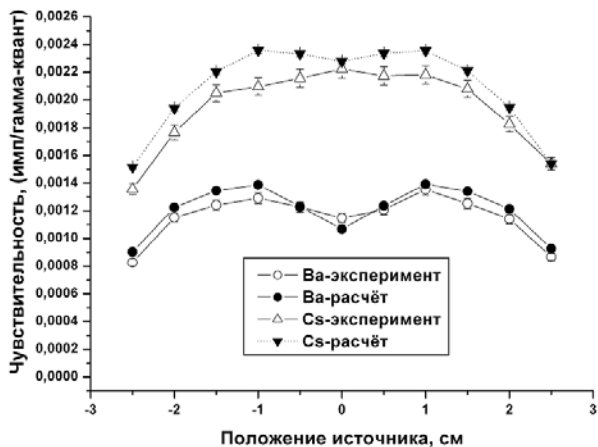


Рис. 11. Кривые чувствительности детектора для ^{133}Ba и ^{137}Cs для варианта геометрии 2

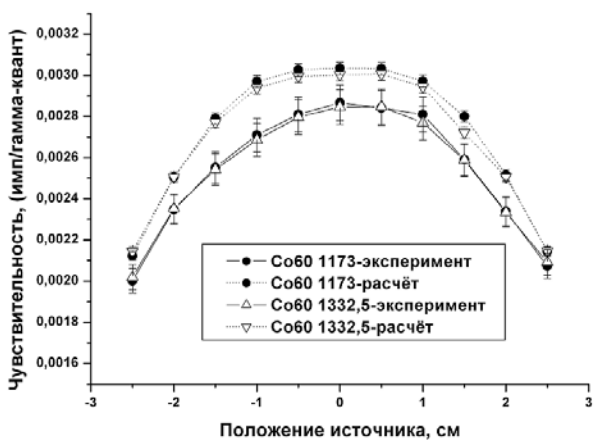


Рис. 12. Кривые чувствительности детектора для ^{60}Co с энергиями 1173,23 кэВ и 1332,5 кэВ для варианта геометрии 2

На рис. 13 представлена кривая чувствительности детектора для варианта геометрии 3.

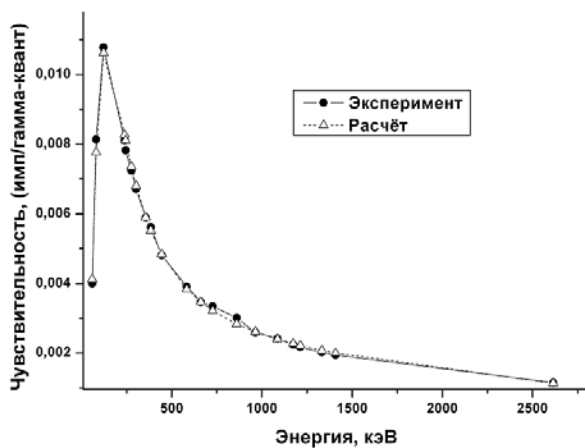


Рис. 13. Чувствительность регистрации детектора для варианта геометрии 3

Относительная статистическая погрешность расчётных данных не превышала 1 %. Относительная погрешность экспериментальных значений чувствительности не превышала 3 %.

Из графиков, изображённых на рис. 7–13, можно сделать вывод об удовлетворительном согласовании экспериментальных и расчётных кривых чувствительности детектора для трёх вариантов геометрии.

В качестве критерия верификации модели была выбрана величина $\Omega_{\text{модель}}$, ожидаемая погрешность аппроксимации:

$$\Omega_{\text{модель}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\epsilon_{\gamma i}^{\text{эксп}} - \epsilon_{\gamma i}^{\text{расч}}}{\Delta \epsilon_{\gamma}^{\text{эксп}}} \right)^2} \quad (1)$$

где $\epsilon_{\gamma i}^{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение чувствительности для i -го значения энергии; $\epsilon_{\gamma i}^{\text{расч}}$ – расчётное значение чувствительности для i -го значения энергии; $\Delta \epsilon_{\gamma}^{\text{эксп}}$ – погрешность экспериментального значения чувствительности для i -го значения энергии; N – количество измерений.

В табл. 2 представлены значения степеней согласия расчётных и экспериментальных данных.

Таблица 2

Значения степеней согласия расчётных и экспериментальных данных

Нуклид	Энергия гамма-излучения, кэВ	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
^{241}Am	59,540	1,371	1,124	0,864
^{57}Co	122,060	1,541	1,120	
^{133}Ba	356,017	1,895	2,129	
^{137}Cs	661,662	0,885	2,710	
^{60}Co	1173,230	0,808	2,392	
^{60}Co	1332,500	0,826	2,221	

Выборочные значения чувствительности детектора для источников гамма – излучения с геометрией, отличающейся от геометрии точечных

Энергия, кэВ	Материал	Реакция	Чувствительность			Поправка		
			10 мм	20 мм	65 мм	10 мм	20 мм	65 мм
159,381	Титан	$^{47}_{22}\text{Ti}(n, p)$	0,010311	0,010260	0,009826	1,018480	1,023420	1,068640
				0,009645			1,088700	
336,21	Индий	$^{115}_{49}\text{In}(n, n')$	0,006204	0,006190	0,005939		1,035860	1,079780
				0,005850			1,096220	
411,802	Золото	$^{197}_{79}\text{Au}(n, \gamma)$	0,005423	0,005410			1,002080	
			0,005284			1,033500		
511	Медь	$^{63}_{29}\text{Cu}(n, \gamma)$	0,004473	0,004807			0,943400	
511	Цинк	$^{64}_{30}\text{Zn}(n, p)$	0,004468	0,004543		0,999710	1,012870	

После усреднения по всем значениям получим для детектора $\langle \Omega_{\text{модель}} \rangle = 1,35$

Полученный результат говорит об удовлетворительном согласии расчётных и экспериментальных данных и, следовательно, о пригодности модели для дальнейших расчётов.

3. Расчёт поправок для стандартных используемых образцов

Для варианта геометрии 3 рассчитывались поправки, учитывающие отличие геометрий точечного и цилиндрического источников.

Поправки определялись по соотношению:

$$K = \frac{\varepsilon_{\text{точ}}}{\varepsilon_{\text{цил}}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{точ}}$ – расчётное значение чувствительности для точечного источника; $\varepsilon_{\text{цил}}$ – расчётное значение чувствительности для цилиндрического источника.

В табл. 3 представлены выборочные расчётные значения поправок для каждого продукта используемых реакций, а также выборочные значения чувстви-

тельности детектора, определённые на основе калибровочных данных с использованием ОСГИ-3 и введением полученных поправок.

Заключение

1. С использованием точечных ОСГИ-3 проведена калибровка энергетической зависимости чувствительности детектора к гамма-излучению.

2. Создана расчётная модель детектора для определения значений поправок, учитывающих отличие геометрии калибровки от геометрии рабочих измерений.

3. Расчётная модель верифицирована по результатам комплекса тестовых измерений с использованием коллимированного пучка гамма-квантов.

Литература

1. Tart 2012 an overview of acoupled neutron-photon 3-D, Combinatorial geometry time dependent monte carlo transport code, ID CCC-0638/10, Report llnl-tr-577352, Lawrence Livermore National Laboratory, 2012.