

## ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А. А. Александров, И. Ю. Дроздов

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

Приведено краткое описание расчетной модели детектора и элементов его конструкции. Рассмотрены три варианта геометрии измерений «источник – детектор». Представлены результаты расчета и измерений чувствительности детектора по модели для разных вариантов геометрии и проведено их сравнение. Проведена верификация расчетной модели с использованием коллимированного пучка гамма-квантов. Представлены значения степеней согласия расчетных и экспериментальных данных и приведены выборочные значения поправок для стандартных используемых образцов на отличие калибровочной геометрии «ОСГИ – детектор» от типичной геометрии измерения «диск – детектор».

**Ключевые слова:** полупроводниковый детектор, расчетная модель, верификация расчетной модели, геометрия измерений «источник – детектор», чувствительность детектора, точечный источник, поправки для стандартных используемых образцов.

**VERIFICATION OF DESIGN MODEL OF SEMICONDUCTOR DETECTOR INVOLVED IN RADIOMETRIC FACILITY / A. A. ALEKSANDROV, I. YU. DROZDOV** // There is presented a brief description of the detector design model and its structural components. Three versions of measurement geometry «source-detector» are considered. There are given on the base of the model the results of calculation and detector sensitivity measurements for different versions of geometry and their comparison is made. The design model was verified using a collimated beam of gamma quanta. The «goodness of fit» values for calculated and experimental data are given, and the sampled values of corrections for the applied standard models as to the difference between calibration geometry «OSGI – detector» and typical measurement geometry «disc – detector» are cited.

**Key words:** semiconductor detector, design model, design model verification, measurement geometry «source – detector», detector sensitivity, point source, corrections for applied standard models.

### Расчетная модель

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 наведенная активность, и они становятся источниками гамма-излучения. Наведенная в дисковых источниках активность измеряется на полупро-

водниковых детекторах, но перед этим производятся калибровочные измерения с использованием ОСГИ (образцовых спектрометрических гамма-источников).

Вследствие отличия размеров дисковых источников от точечных при измерении их наведенной активности требуется вводить поправки на отличие их геометрии от геометрии точечных источников. В данной работе расчеты поправок проводились по методу Монте-Карло, реализованному в алгоритмах про-

граммы Tart [1]. Однако результаты такого расчета могут быть признанными удовлетворительными только при наличии верифицированной расчетной модели детектора. Верификация расчетной модели проводится в серии отдельных тестовых измерений.

Данная работа актуальна тем, что более точные расчеты поправок, выполненные по верифицированной модели детектора, позволяют корректнее и точнее определять активационные интегралы в рамках нейтронно-активационного метода.

Для реализации возможности сканирования объема 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 объем детектора, но и элементы конструкции вокруг него. Таким образом, о размерах кристалла, толщине «мертвого 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.

Расчетная модель детектора GCD 40190 зав. № 2142-14 (полупроводниковый детектор, высота германиевого кристалла 6,13 см, наружный диаметр кристалла 6,1 см, внутренний диаметр центральной выемки в кристалле 0,550 см, высота выемки в кристалле 3,875 см) в настоящей работе задавалась в кодах программы Tart. В расчете по программе Tart для имитации отклика детектора используется задача типа Sentl 33. В этой задаче в заданной области пространства регистрируется вся энергия, оставленная налетающей частицей (гамма-квантом), а также вторичными частицами (электронами).

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 (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 ( $^{241}\text{Am}$ ), 356,017 кэВ ( $^{133}\text{Ba}$ ), 661,662 кэВ ( $^{137}\text{Cs}$ ), 1173,23 и 1332,5 кэВ ( $^{60}\text{Co}$ ), 122,06 кэВ ( $^{57}\text{Co}$ ). В этом варианте с помощью гамма-квантов различных энергий сканируется расположение центральной выемки кристалла, ее высота и диаметр. «Работает» объем кристалла, ограниченный узким телесным углом.

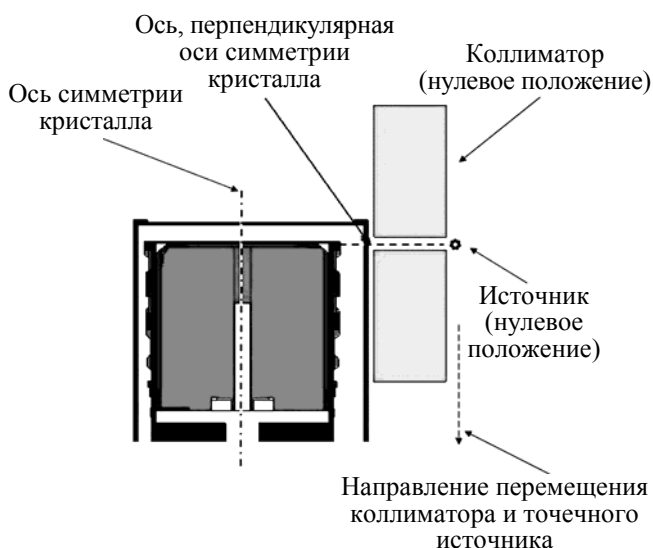


Рис. 1. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 1)

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

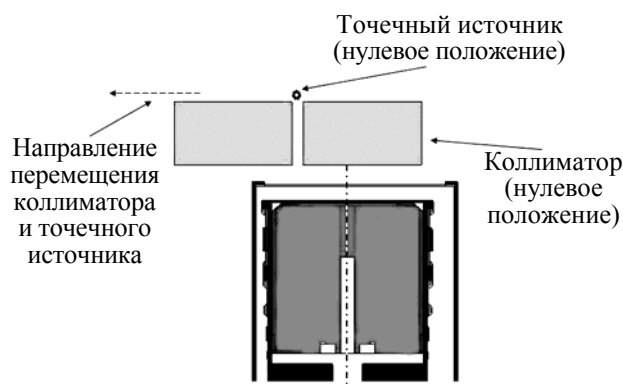


Рис. 2. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 2)

*Вариант 3.* Источник располагался на оси, параллельной оси симметрии кристалла, на расстоянии 10 см от торцевой поверхности корпуса детектора (рис. 3). Чувствительность определялась в нулевом положении для энергий: 59,537 кэВ ( $^{241}\text{Am}$ ), 356,017 кэВ ( $^{133}\text{Ba}$ ), 661,662 кэВ ( $^{137}\text{Cs}$ ), 1173,23 и 1332,5 кэВ ( $^{60}\text{Co}$ ), 122,06 кэВ ( $^{57}\text{Co}$ ). «Работает» весь объем кристалла.

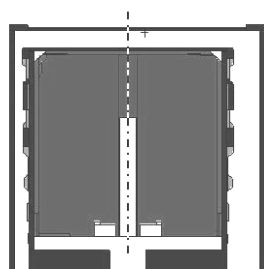


Рис. 3. Положение источника и коллиматора относительно детектора (вариант 3)

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

### 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 расчет по методу Монте-Карло, в котором учитывается многократное рассеяние гамма-квантов в материале источника и попадание гамма-излучения в объем детектора реальной (не идеальной) конфигурации.

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

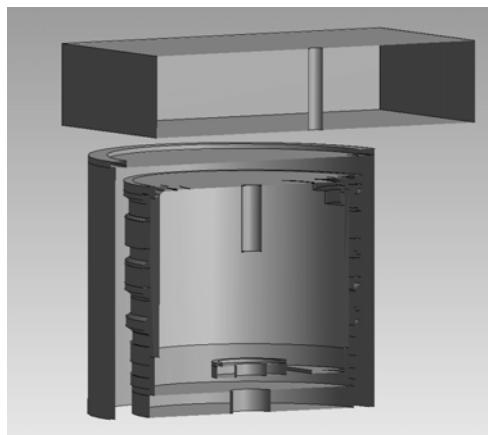


Рис. 4. 3D-модель детектора в осевом разрезе для варианта «коллиматор над детектором»

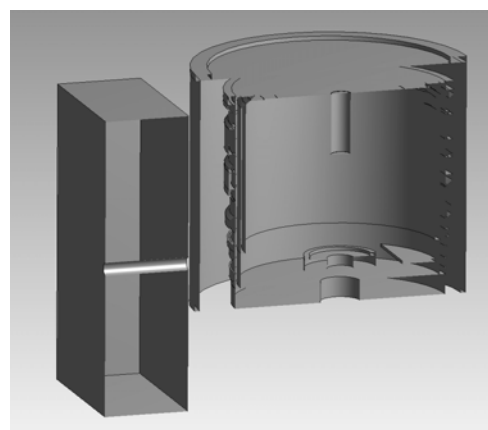


Рис. 5. 3D-модель детектора в осевом разрезе для варианта «коллиматор сбоку от детектора»

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

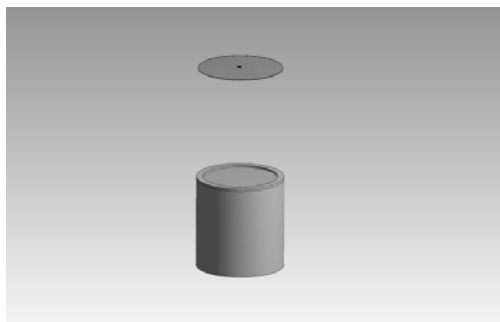


Рис. 6. 3D-модель детектора для варианта «без коллиматора» с точечным источником

### Сравнение результатов измерений и расчета по модели

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

На рис. 7–9 представлены зависимости чувствительности детектора от положения источника для варианта геометрии 1.

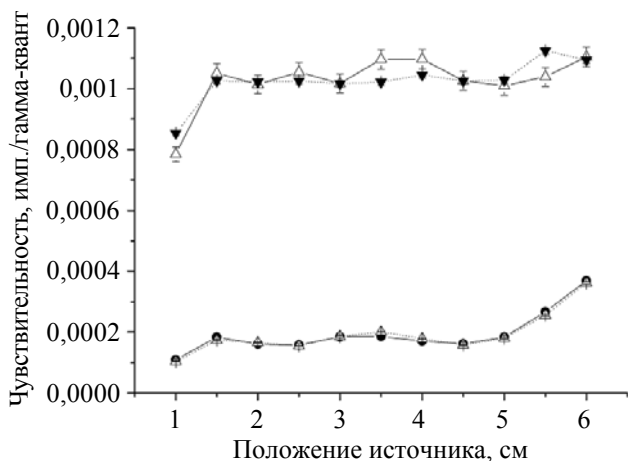


Рис. 7. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{241}\text{Am}$  (—●— эксперимент; ...▲... – расчет) и  $^{57}\text{Co}$  (—▲— эксперимент; ...▼... – расчет) для варианта геометрии 1

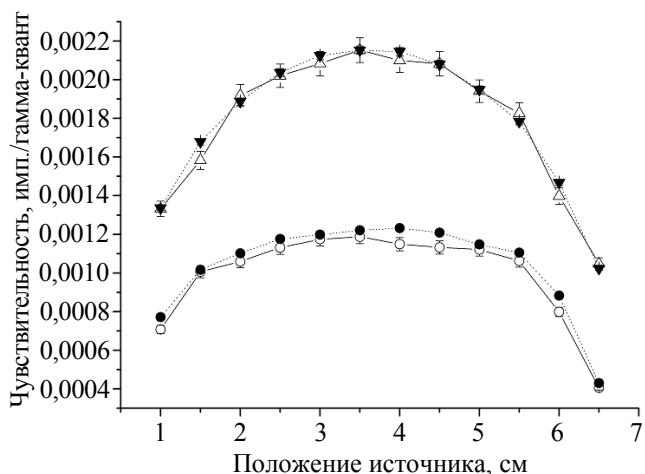


Рис. 8. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{133}\text{Ba}$  (—○— эксперимент; ...●... – расчет) и  $^{137}\text{Cs}$  (—▲— эксперимент; ...▼... – расчет) для варианта геометрии 1

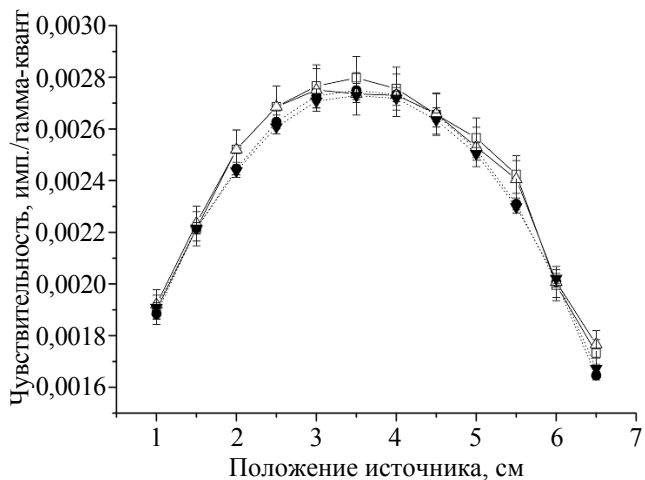


Рис. 9. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{60}\text{Co}$  с энергиями 1173,23 кэВ и 1332,5 кэВ для варианта геометрии 1 (—□—  $\text{Co}$  1173-эксперимент; ...●... –  $\text{Co}$  1173-расчет; —▲—  $\text{Co}$  1332,5-эксперимент; ...▼... –  $\text{Co}$  1332,5-расчет)

На рис. 10–12 представлены зависимости чувствительности детектора от положения источника для варианта геометрии 2.

На рис. 13 представлена зависимость чувствительности детектора от энергии источников гамма-излучения для варианта геометрии 3.

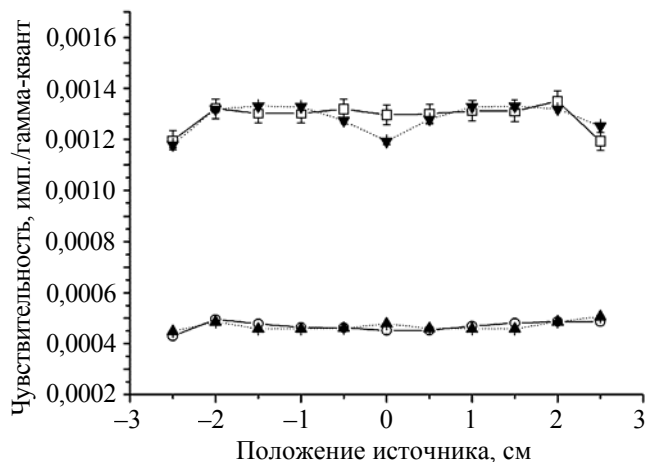


Рис. 10. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{241}\text{Am}$  (—○— эксперимент; ...▲... – расчет) и  $^{57}\text{Co}$  (—□— эксперимент; ...▼... – расчет) для варианта геометрии 2

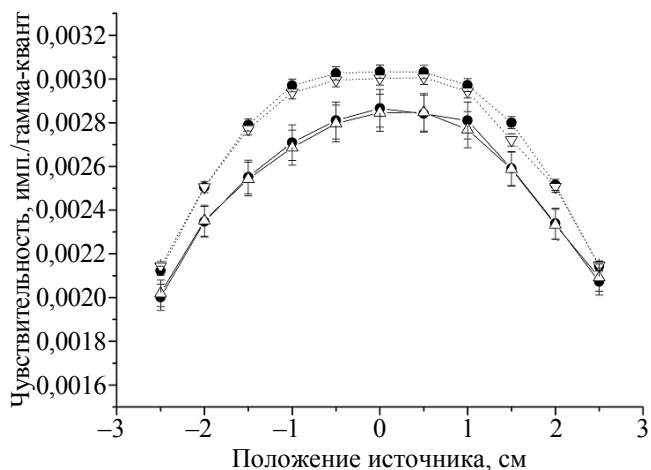


Рис. 12. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{60}\text{Co}$  с энергиями 1173,23 кэВ (—●— эксперимент; ...●... – расчет) и 1332,5 кэВ (—▲— эксперимент; ...▼... – расчет) для варианта геометрии 2

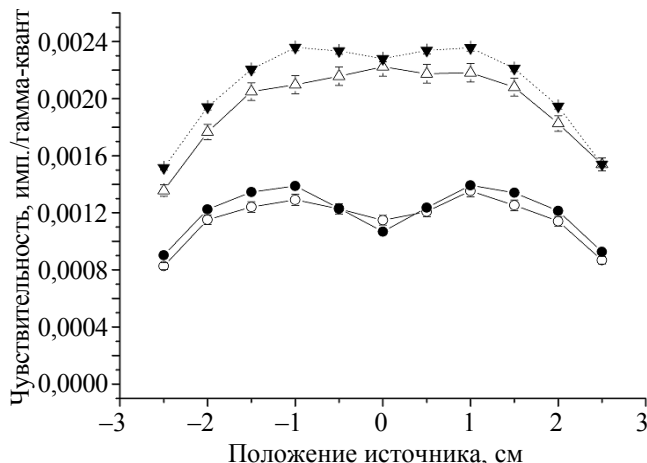


Рис. 11. Зависимости чувствительности детектора от положения источника для  $^{133}\text{Ba}$  (—○— эксперимент; —●— расчет) и  $^{137}\text{Cs}$  (—▲— эксперимент; ...▼... – расчет) для варианта геометрии 2

Относительная статистическая погрешность расчетных данных не превышала 1%. Относительная погрешность экспериментальных значений чувствительности не превышала 3%. Из графиков на рис. 7–13, можно сделать вывод

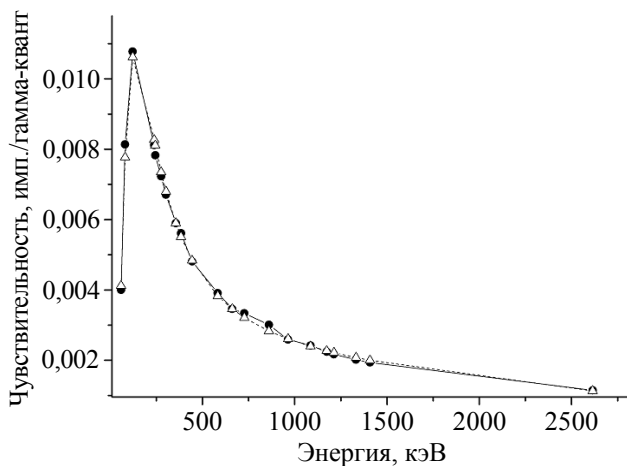


Рис. 13. Зависимость чувствительности детектора от энергии источников гамма-излучения для варианта геометрии 3 (—●— эксперимент; ...▲... – расчет)

об удовлетворительном согласовании экспериментальных и расчетных зависимостей чувствительности детектора от положения источника для трех вариантов геометрии.

Выборочные значения чувствительности детектора для источников гамма-излучения с геометрией, отличающейся от геометрии точечной

Энергия, кэВ	Материал	Реакция	Чувствительность			Поправка		
			10 мм	20 мм	65 мм	10 мм	20 мм	65 мм
159,381	Титан	$^{47}\text{Ti}(n, p)$	0,010311	0,010260	0,009826	1,019	1,023	1,069
336,210	Индий	$^{115}\text{In}(n, n')$	0,006204	0,006190	0,005939	1,034	1,036	1,080
810,764	Никель	$^{58}\text{Ni}(n, p)$	0,003117	0,003097	0,002987	1,022	1,028	1,066
908,960	Цирконий	$^{90}\text{Zr}(n, 2n)$	0,002893	0,002867	0,002777	1,009	1,018	1,051
1368,63	Алюминий	$^{27}\text{Al}(n, a)$	0,002153	0,002139	0,002080	1,000	1,005	1,034

### Расчет поправок для стандартных используемых образцов

Для варианта геометрии 3 рассчитывались поправки, учитывающие отличие геометрий точечного и цилиндрического источников. Поправки определялись по соотношению

$$K = \frac{\varepsilon_{\text{точ}}}{\varepsilon_{\text{цил}}},$$

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

В табл. 2 представлены выборочные расчетные значения поправок для каждого продукта используемых реакций, а также выборочные значения чувствительности детектора, определенные 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 расчетная модель детектора для определения значений поправок, учитываю-

щих отличие геометрии калибровки от геометрии рабочих измерений.

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

4. Расчетная модель признана пригодной для расчета поправок в активационных измерениях.

### Список литературы

1. Tart 2012 an overview of a coupled neutron – photon 3–D. Combinatorial geometry time dependent montecarlo transport code. Report Lnlntr-577352, Lawrence Livermore National Laboratory, 2012 / Лицензия ССС-0638/10.

Контактная информация –

Александров Александр Александрович,  
инженер по испытаниям ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: AAAleksandrov@vniief.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2018.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 91–96.