

УДК 543.427

© А. Ю. Портной, Г. В. Павлинский, М. С. Горбунов

ОБ ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОГО ДВУХСЛОЙНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА

Предложена математическая модель двухслойного Si-Ge энергодисперсионного детектора рентгеновского излучения, основанная на анализе процессов переноса фотонов и электронов высокой энергии в веществе детектора и позволяющая оценивать параметры функции отклика детектора. Методом Монте-Карло рассчитаны вероятности регистрации фотонов в различных частях функции отклика детектора. Показано, что при использовании схемы антисовпадений либо схемы суммирования амплитуд импульсов таких детекторов и использовании в качестве первого слоя Si-детектора, а второго слоя Ge-детектора возможно получение детектора с улучшенными свойствами — с подавлением пика фотопотерь Ge-детектора и эффективностью регистрации при высокой энергии излучения, близкой к эффективности Ge-детектора.

Кл. сл.: рентгеновский детектор, функция отклика, соотношение сигнал/фон, подавление фона

ВВЕДЕНИЕ

Для большого класса работ, связанного с проектированием аппаратуры, использующей рентгеновское излучение, необходимо иметь предварительную информацию о регистрируемом сигнале, формирующем как полезный сигнал, так и сопутствующий ему фон. Важным параметром детектора является функция отклика детектора, представляющая собой распределение вероятностей регистрации фотона с энергией E_0 как фотона с энергией E .

Данная работа направлена на моделирование характеристик двухслойного детектора, обусловленных процессами переноса излучения и электронов в детекторе. Расчет энергетических спектров, возникающих при переносе излучения, обычно выполняется с использованием транспортных уравнений или методом Монте-Карло. Моделирование спектров излучения образца методом Монте-Карло, обусловленных многократными радиационными взаимодействиями, рассмотрено, например, в работах [1–4]. Решение подобных задач с помощью транспортного уравнения рассмотрено в работах [5–6]. Однако использование транспортных уравнений при исследовании параметров детекторов затруднено вследствие сложной формы детекторов и ограниченного их объема.

Исследованию функции отклика детектора посвящен ряд работ, например [7–15]. Однако в них не уделяют должного внимания возможности регистрации фотона в низкоэнергетической области после его комптоновского рассеяния в детекторе. В работе [7] упоминается об этой существенной составляющей функции отклика детектора ("горб

потерь", либо "антикомптоновский пик"). Жуковский и др. [8] приводят формулу для расчета интенсивности указанной составляющей функции отклика детектора, однако обращено внимание на то, что формула не везде корректна. В работах [9–12] рассматривается функция отклика в районе достаточно низких (до 20 кэВ) энергий регистрируемых фотонов, где "горб потерь" смещен в низкоэнергетическую область и не является существенным. В работах [16, 17] рассматривается формирование сигнала и фона, однако отсутствует математическое описание процессов, формирующих функцию отклика детектора. Расчету функции отклика детектора с учетом "горба потерь", являющимся важной составляющей функции отклика детектора при высоких энергиях регистрируемых фотонов, методом Монте-Карло посвящены наши работы [13, 14], в которых также показана возможность расчета аналитического сигнала и фона в EDXRF путем рассмотрения процессов переноса энергии в образце и детекторе.

Для Si-детектора в областях энергий выше 30 кэВ существенной становится вероятность регистрации в "горбе потерь", что приводит к существенному увеличению фона в области малых энергий [14, 15].

Для подавления "горба потерь" в гамма-области излучения применялись схемы [18, 19], в которых использовались сегментированные либо двухслойные Ge-детекторы и электронные схемы, работающие либо в режиме с режекцией одновременно пришедших импульсов, либо в режиме суммирования амплитуд одновременно пришедших импульсов.

Существенным недостатком Ge-детектора является высокая вероятность регистрации в пиках

К-фотопотерь в областях энергий выше К-края поглощения вследствие большого выхода флуоресценции Ge. Этот процесс приводит к увеличению фона в областях, отличающихся от энергии регистрируемых интенсивных линий на энергию Ка и Кб флуоресцентных фотонов Ge [15].

В рассматриваемом в данной работе детекторе для регистрации излучения использованы Si- и Ge-детекторы рентгеновского излучения, расположенные непосредственно друг за другом, а также электронная схема, аналогичная по свойствам использованной в работах [18, 19]. Ближним к источнику ионизирующего излучения является тонкий (порядка 0.5 мм) Si-детектор, который выполняет роль основного детектора падающего излучения при энергиях излучения до 10 кэВ, и роль детектора фотонов К-фотопотерь Ge-детектора при более высоких энергиях (рис. 1).

Цель данной работы — расчет параметров функции отклика подобного комбинированного детектора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

В детекторе при регистрации фотона в рентгеновской области излучения происходят процессы фотопоглощения, когерентного и комптоновского рассеяния. В результате набора подобных взаимодействий фотон, попавший в детектор с энергией E_{det} , может быть полностью поглощен, преобразовавшись в поток электронов, которые в дальнейшем дадут импульс тока с зарядом $Q_{\text{det}} = C \cdot E_{\text{det}}$ (C — коэффициент пропорциональности) и будут зарегистрированы аппаратурой как импульс, соответствующий E_{det} . В то же время фотон может быть рассеян веществом детектора и покинуть его

с энергией $E_{\text{det_out}}$. Тогда оставшиеся в детекторе свободные электроны будут зарегистрированы как фотон с энергией $E'_{\text{det}} = E_{\text{det}} - E_{\text{det_out}}$. В этом случае при регистрации образуется пик потерь в результате фотопоглощения с последующей флуоресценцией и "горб потерь" в результате комптоновского рассеяния.

Для численной оценки результатов многократных взаимодействий излучения с веществом детектора был применен метод Монте-Карло, который позволяет учесть геометрические особенности детектора и возможность многократных взаимодействий. При большом количестве испытаний (10^6) точность этого метода становится вполне приемлемой для целей оценки свойств детекторов. Вероятности взаимодействия фотона с веществом детектора [15] описывались по данным публикаций: фотопоглощения — согласно работе [20], когерентного и комптоновского рассеяния — согласно [21, 22]. Выход флуоресценции взят согласно [23].

При каждом событии, при котором появляется электрон с высокой энергией (фотопоглощение, безрадиационный (Оже) переход, комптоновское рассеяние), просчитывается вероятность выхода электрона за пределы чувствительной области детектора [15]. При этом используется приближение Томсона—Уидингтона [24] и поправка на анизотропность электронов [9].

Количество анализируемых событий равно 10^6 для каждой из энергий влетающего фотона в диапазоне энергий 1–100 кэВ с шагом 0.1 кэВ. Полученный результат корректируется на поглощение попадающего в детектор излучения во входном бериллиевом окне детектора.

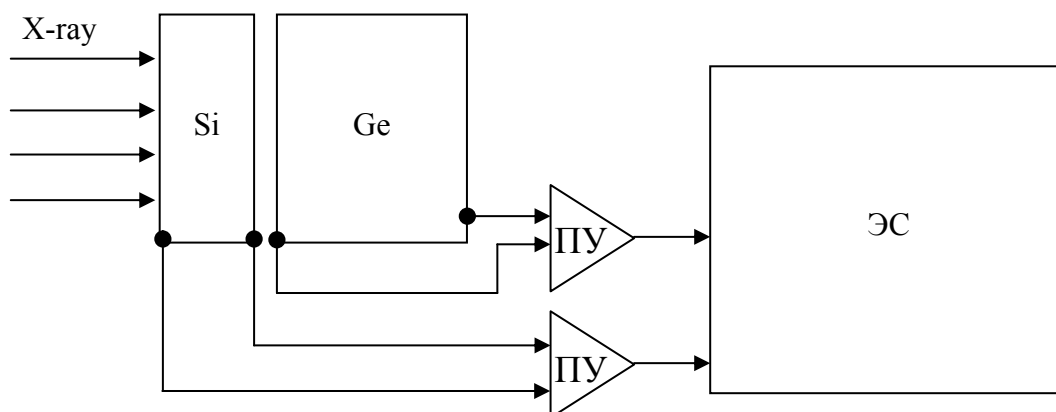


Рис. 1. Структурная схема комбинированного двухслойного рентгеновского детектора. ПУ — отдельные для Si- и Ge-детектора предусилители; ЭС — электронная схема, обеспечивающая режим суммирования амплитуд одновременно пришедших импульсов или режим режекции таких импульсов

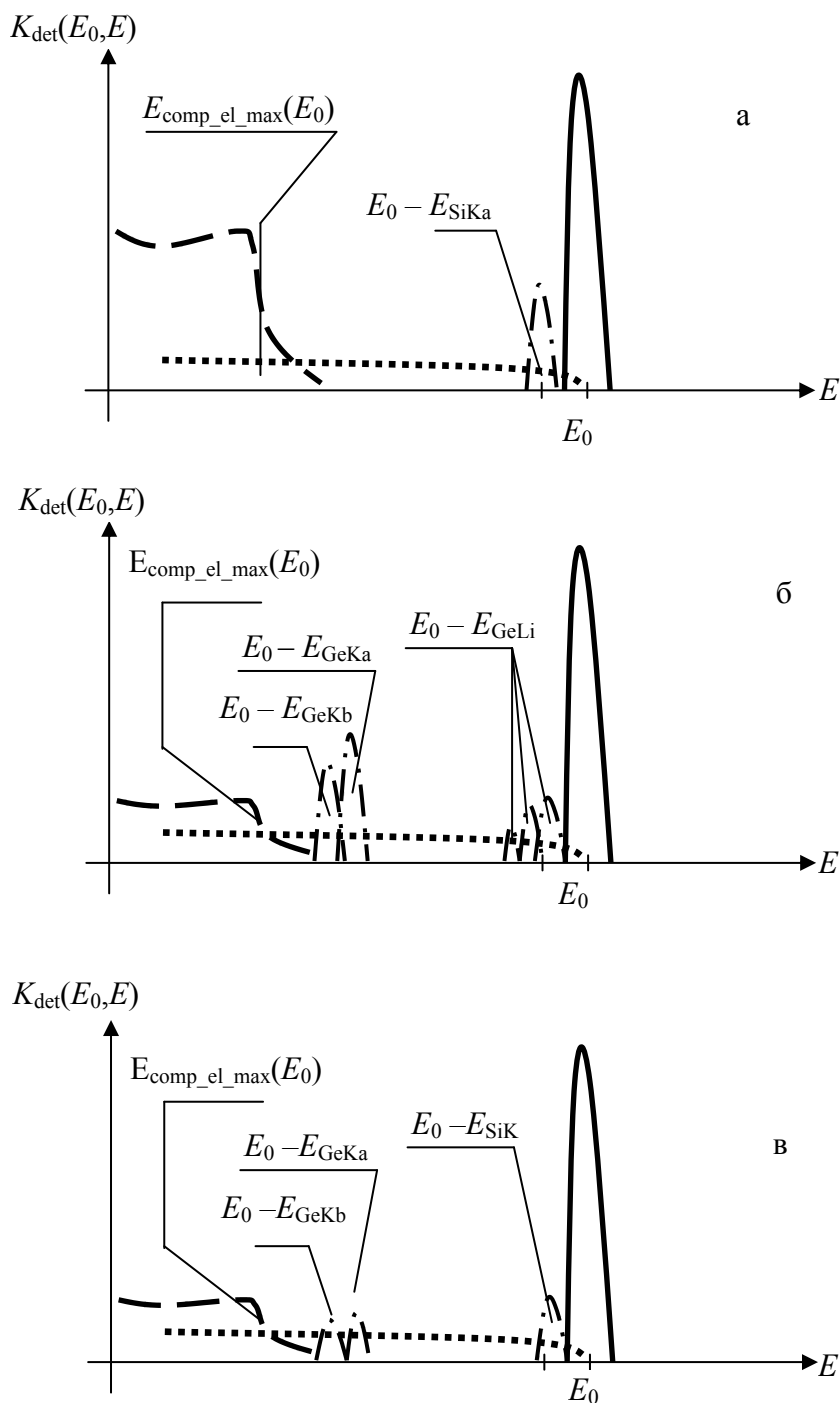


Рис. 2. Структура функции отклика детектора в рентгеновской области энергий фотонов. а — Si-детектор; б — Ge-детектор; в — комбинированный Si-Ge-детектор. Непрерывная линия — регистрация в пике полного поглощения; штрихпунктирная — в пиках потерь; пунктирная — в "горбе потерь"; точечная — в "хвосте", обусловленном выходом электронов

Так как результатам моделирования по методу Монте-Карло всегда присуща статистическая погрешность, то вводится сглаживание полученных результатов. При этом учитывается как энергетическое разрешение конкретного детектора, так и уширение аналитических линий с ростом энергии фотона. Сглаживание ведется с окном, соответствующим энергетическому разрешению детектора, наблюдаемому экспериментально на линиях флуоресценции.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА В РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

На рис. 2, а, показана структура функции отклика Si-детектора $K_{\text{det}}(E_0, E)$, которая представляет собой распределение вероятности регистрации попавшего в детектор фотона с энергией E_0 как фотона с энергией E . В случае полного поглощения энергии фотона в детекторе он будет зарегистрирован

стрирован в пике полного поглощения с энергией E_0 ; в случае фотопоглощения с последующим выходом флуоресцентного фотона Si — в "пике К-фотопотерь" с энергией $E_0 - E_{Ka}$; в случае выхода электрона высокой энергии из чувствительной области детектора — в "хвосте" с энергией от 0 до E_0 ; в случае комптоновского рассеяния с выходом рассеянного фотона из детектора — в "горбе потерь" с энергией от 0 до максимальной энергии электронов отдачи $E_{comp_el_max}(E_0)$.

Структура функций отклика Ge-детектора (рис. 2, б) несколько отличается от функции отклика Si-детектора:

- в области энергий фотонов ниже К-края поглощения Ge примерно до 5 кэВ существенным является L-пик фотопотерь, содержащий компоненты, соответствующие L-излучению Ge;

- в области энергий фотонов выше К-края поглощения Ge очень большая вероятность выхода флуоресцентного фотона Ge из детектора вследствие большего, чем у Si, выхода флуоресценции. Это обуславливает очень большую вероятность (порядка 20 %) регистрации фотона в пике К-фотопотерь. При увеличении энергии фотона вероятность регистрации в пике К-фотопотерь монотонно убывает, однако до энергий порядка 50–60 кэВ составляет не менее 1 %. Следствием этого в спектрах EDXRF будут линии, отличающиеся от ярких линий спектра на энергию Ka и Kb флуоресцентных квантов Ge.

Структура функции отклика, рассматриваемого в данной работе комбинированного детектора, приведена на рис. 2, в. Отличием является наличие пиков К-фотопотерь как Si, так и Ge (вероятность регистрации в L-пике фотопотерь является ничтожной). При этом интенсивность Ge-пика фотопотерь в комбинированном детекторе существенно ниже, чем для чисто Ge-детектора. Это связано с тем, что флуоресцентные фотоны Ge, выход которых через входную плоскость детектора сопровождается появлением пика фотопотерь, эффективно поглощается чувствительным слоем Si-детектора.

Результаты расчета вероятностей регистрации фотона в разных частях функции отклика детектора показаны на рис. 3 а, б, для Si- и Ge-детекторов с толщинами, используемыми в комбинированном детекторе, и на рис. 3, в, — для рассматриваемого комбинированного детектора.

В работе [15] показано, что изменение толщины детектора в основном влияет на вероятность регистрации фотона в пике полного поглощения p_{eff} и в "горбе потерь", обусловленном выходом комптоновски рассеянного фотона p_{comp} . Вероятности регистрации в пике К-фотопотерь p_{ph} и "хвосте", обусловленном выходом электронов p_{el} , практически не зависят от толщины при размерах, характерных для полупроводниковых детекторов.

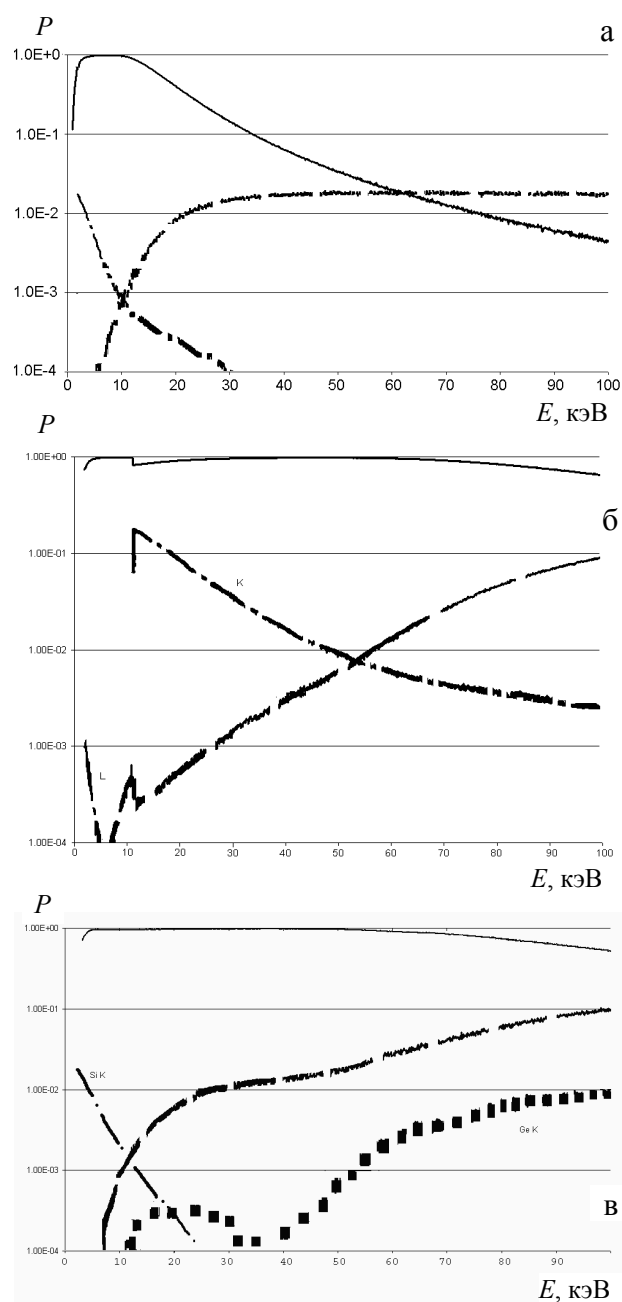


Рис. 3. Зависимости от энергии фотонов вероятностей событий в детекторах.

а — детектор Si толщиной 0.6 мм; б — детектор Ge толщиной 5 мм; в — комбинированный детектор с толщиной Si-детектора 0.6 мм и Ge-детектора 5 мм.

Вероятности: непрерывная линия — p_{eff} полного поглощения энергии фотона в детекторе; пунктирная линия — p_{comp} регистрации фотона в "горбе потерь"; штрихпунктирная линия (а, б) — p_{ph} регистрации фотона в пиках К-фотопотерь и L-фотопотерь для Ge-детектора; на (в) штрихпунктирная линия — p_{ph} регистрации фотона в пиках К-фотопотерь Si, а точечная линия — К-фотопотерь Ge

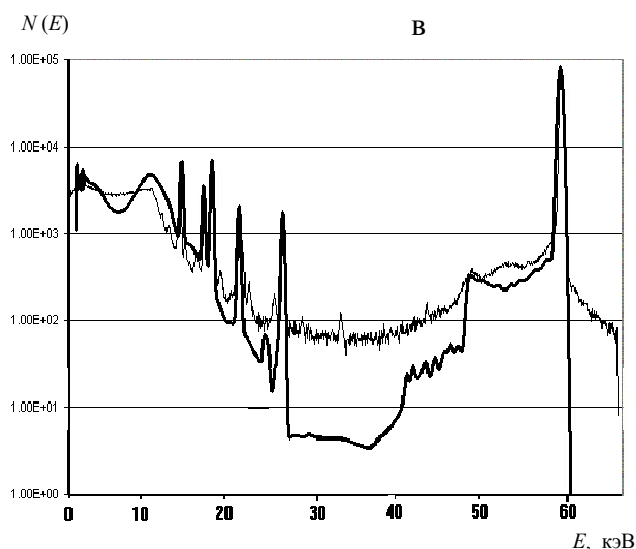
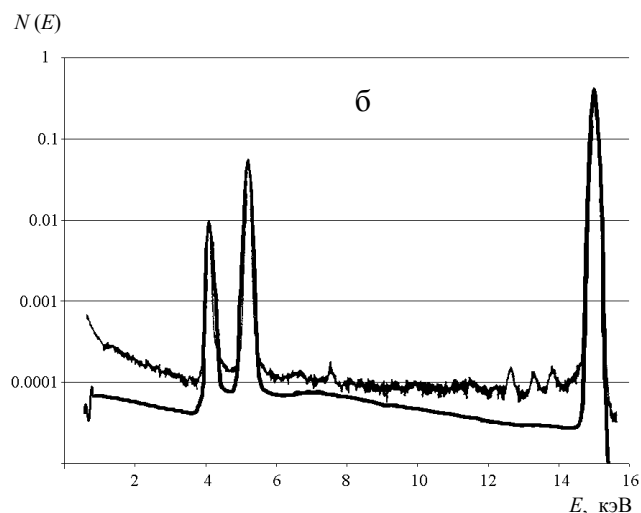
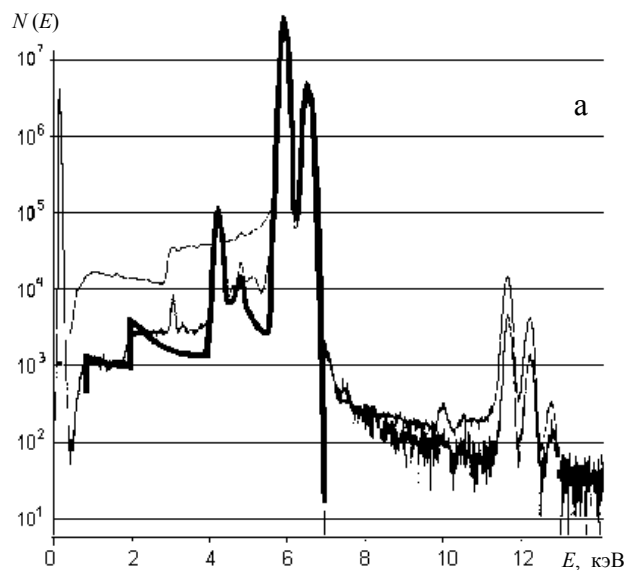


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

а — расчеты настоящей работы (толстая линия) и экспериментальные данные, приведенные в работе [10] для двух Si-детекторов (тонкая линия). Источник излучения — ^{55}Fe .

б — расчеты настоящей работы (толстая линия) и экспериментальные данные, полученные в работе [11] (тонкая линия) для Ge-детектора. Источник излучения с энергией 15 кэВ.

в — амплитудный спектр, полученный при облучении Si-детектора излучением источника ^{241}Am . Толстая линия — расчет, тонкая — эксперимент работы [13]

Сопоставление наших расчетных и экспериментальных данных работ [10], [11] по соотношению пика полного поглощения и пика фотопотерь приведено на рис. 4, а, и 4, б, соответственно. Наблюдается удовлетворительное согласие, что позволяет считать предложенную модель регистрации рентгеновских фотонов детектором соответствующей современным экспериментальным данным для высококачественных Si- и Ge-детекторов в области энергий до 20 кэВ. Для проверки результатов расчета в области энергий излучения, где регистрация в "горбе потерь" становится существенной, проведено сопоставление рассчитанных данных с результатом измерения [13] спектра источника ^{241}Am (рис. 4, в). Результаты расчета

хорошо ($\pm 30\%$) согласуются с экспериментальными данными для областей энергий 1–25 кэВ (область регистрации в "горбе потерь") и 40–60 кэВ (область регистрации рассеянного излучения) при использовании источника излучения ^{241}Am , что говорит об удовлетворительной адекватности предложенной модели.

В рассматриваемом комбинированном полупроводниковом детекторе регистрация фотона низкой энергии (до 8–20 кэВ в зависимости от толщины используемого Si-детектора) осуществляется Si-детектором, имеющим низкую вероятность регистрации фотона в пике фотопотерь. При большей энергии фотона (диапазон энергий 8–40 кэВ) регистрация фотона происходит как в Si-, так

и в Ge-детекторе. При этом существует практически 100 %-ная вероятность того, что флуоресцентный фотон Ge-детектора, выходящий через входную плоскость детектора (случай, когда для одиночного Ge-детектора фотон будет зарегистрирован в пике фотопотерь), будет зарегистрирован Si-детектором. Эти два события (регистрация Ge-детектором фотона в пике фотопотерь и регистрация флуоресцентного фотона Ge кремниевым детектором) будут зарегистрированы как практически одновременные события, что предполагает два варианта работы электронной схемы, аналогичной приведенным в работах [18, 19]:

- с суммированием амплитуд импульсов, что должно позволить получить полную энергию попавшего в комбинированный полупроводниковый детектор фотона;

- с запрещением работы схемы регистрации (схема антисовпадений).

Для комбинированного полупроводникового детектора рентгеновского излучения видны следующие преимущества (рис. 3, в):

- вероятность регистрации в пике полного поглощения при высоких энергиях излучения близка к таковой для Ge детектора;

- отсутствие провала эффективности при переходе через К-край поглощения Ge, поскольку, во-первых, провал эффективности обусловлен регистрацией фотона Ge-детектором в пике К-фотопотерь, во вторых — регистрация большей части излучения для данной области излучения происходит в Si-детекторе;

- меньшая интенсивность регистрации в "горбе потерь", чем для толстого Si-детектора [15]. Это объясняется тем, что при высоких энергиях излучения регистрация фотонов происходит в основном в Ge-детекторе;

- несмотря на то что интенсивность пика фотопотерь Si в комбинированном детекторе несильно отличается от таковой для Si-детектора, она все равно ниже, чем интенсивность пика фотопотерь Ge для Ge-детектора; интенсивность пиков К-фотопотерь Ge для комбинированного детектора на несколько порядков ниже, чем для Ge-детектора;

- при энергиях излучения, больших 40 кэВ, большая часть рентгеновских фотонов будет регистрироваться в Ge-детекторе, что обуславливает высокую вероятность регистрации в пике полного поглощения, характерную для Ge-детектора в этой области.

Оценка толщины Si-детектора, устанавливаемого перед Ge, может быть выполнена следующим образом:

- во-первых, эффективность Si-детектора на линиях флуоресценции Ge должна быть близка к единице, что обуславливает толщину Si-детектора не менее 0.2 мм;

- во-вторых, должен быть обеспечен спад эффективности Si-детектора в области энергий более 20 кэВ, в которой становится значимой регистрация излучения в "горбе потерь" вследствие комптоновского рассеяния. Это требование обуславливает максимальную толщину Si-детектора 1 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена математическая модель двухслойного комбинированного детектора рентгеновского излучения, состоящего из ближнего к источнику излучения Si-детектора и дальнего Ge-детектора, определяющая его предельные характеристики, связанные с поглощением фотонов веществом детектора. Методом Монте-Карло проведено моделирование функции отклика такого детектора. Показано, что результатом такой схемы построения детектора является уменьшение вероятности регистрации фотона в пике фотопотерь Ge при сохранении высокой вероятности регистрации в пике полного поглощения, характерной для Ge-детектора в области высоких энергий излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Doster J.M., Gardner R.P.* // X-Ray Spectrometry. 1982. V. 11, N 4. P. 173–180.
2. *He T., Gardner R.P., Verghese K.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 1990. V. 299. P. 354–366.
3. *van Dyck P., Torok S., van Grieken R.* // X-Ray Spectrometry. 1986. V. 15. P. 231–238.
4. *Janssens K., Vincze L., van Espen P., et al.* // X-Ray Spectrometry. 1993. V. 22. P. 234–243.
5. *Fernandez J.E., Hubbell J.H., Hanson A.L., et al.* // Radiation Physics and Chemistry. 1993. V. 41. P. 579–630.
6. *Fernandez J.E.* // X-Ray Spectrometry. 1992. V. 21. P. 57–68.
7. *Keith H.D., Loomis T.C.* // X-Ray Spectrometry. 1976. V. 5. P. 93–103.
8. *Жуковский А.Н., Пшеничный Г.А., Мейер А.В.* Высококчувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
9. *Lowe B.G.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2000. V. 439, N 2-3. P. 247–261.
10. *Papp T., Campbell J.L.* // X-Ray Spectrometry. 2001. V. 30. P. 77–82.
11. *Papp T.* // X-Ray Spectrometry. 2003. V. 32. P. 458–469.
12. *Scholz F., Procop M.* // X-Ray Spectrometry. 2009. V. 38. P. 312–321.
13. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Духанин А.Ю. и др.* // Журнал аналитической химии. 2004. Т. 59. С. 1171–1180.

14. Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С. и др. // Журнал аналитической химии. 2009. Т. 64. С. 511–520.
15. Портной А.Ю. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 4. С. 13–23.
16. Nelsen J.A., McMorro D. Elements of Modern X-Ray Physics. Wiley, 2001. 318 p.
17. Vincze U.L., Janssens K., Vekemans B., et al. // Spectrochimica Acta B. 1999. V. 54. P. 1711–1722.
18. Composite Solid State Radiation Detector. UK patent 1233607, 1968.
19. Кондрашов В.В., Соколов А.Д., Benoist A., Gatot-Garbe A., Lubczynsky P. // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 4. С. 130–134.
20. Tihn T.P., Leroux J. // Adv. X-Ray Spectrometry. 1979. V. 9. P. 85–91.
21. Hubbell J.H., Veigele W.J., Braggs E.A., et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. V. 4. P. 471–538.
22. Бахтияров А.В., Пшеничный Г.А. Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение, 1972. Т. 11. С. 200–218.
23. Vambynek W., Crasemann B., Fink R.W., et al. // Reviews of Modern Physics. 1972. V. 44. P. 716–813.
24. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ. М.: Мир, 1979. 423 с.

Иркутский государственный университет путей сообщения (Портной А.Ю.)

НИИ прикладной физики при Иркутском государственном университете (Павлинский Г.В., Горбунов М.С.)

Контакты: Портной Александр Юрьевич,
portnoyalex@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 15.10.2009.

AN ESTIMATION OF PROPERTIES OF TWO LAYER COMPOSITE X-RAY DETECTOR

A. Yu. Portnoy¹, G. V. Pavlinsky², M. S. Gorbunov²

¹*Irkutsk State University of Transport*

²*Applied Physics Institute at Irkutsk State University, Irkutsk*

A mathematical model of two (Si-Ge) layer energy dispersive x-ray detector is proposed. This model is based on the analysis of radiation and electron transport in the detector and allows estimating detector response function parameters. Using Monte-Carlo method the probabilities of photon registration in different parts of detector response function are calculated. The detector with first Si layer and second Ge layer and using time anti-coincidence circuit or time coincidence amplitude summing circuit is considered. It is shown that such detector has improved properties: reduction of Ge loss peak and the total absorption peak registration at high energy photon approaching that of Ge detector.

Keywords: x-ray detector, detector response function, signal to background ratio, background reducing