

УДК 543.427

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

СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ДЕТЕКТОРОВ И РЕНТГЕНОВСКИХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Предложена математическая модель двухслойных Si-Ge, Si-AsGa, Si-CdTe энергодисперсионных детекторов рентгеновского излучения, основанная на анализе процессов радиационного и электронного переносов в детекторе, а также модель рентгеновского флуоресцентного энергодисперсионного спектрометра на базе такого детектора. Методом Монте-Карло проведены расчеты вероятностей регистрации фотонов в различных частях функции отклика детектора. Показано, что при использовании схемы антисовпадений и использовании в качестве первого слоя Si-детектора, а второго слоя Ge-, AsGa- или CdTe-детектора возможно получение детектора с улучшенными характеристиками — с подавлением пиков потерь второго детектора и эффективностью регистрации при высокой энергии излучения, близкой к эффективности второго детектора. Показано, что при использовании такого детектора в рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре в случае рентгенорадиометрического анализа происходит увеличение соотношения сигнал/фон.

Кл. сл.: рентгеновский двухслойный детектор, функция отклика, энергодисперсионный спектрометр, отношение сигнал/фон

ВВЕДЕНИЕ

Соотношение аналитический сигнал / фон обуславливает такие важные метрологические параметры аппаратуры, как предел обнаружения, для любого спектрального метода анализа. В энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализе (EDXRF), который широко применяется для определения химического состава, это соотношение в значительной мере зависит от свойств детектора (Si- или Ge-детекторы) и регистрирующей электроники, при этом функция отклика детектора играет важную роль в формировании отношения сигнал / фон.

Расчет параметров функции отклика детектора в настоящее время в большинстве случаев осуществляется методом Монте-Карло [1–4], который позволяет моделировать многократные взаимодействия, происходящие в детекторе при регистрации излучения. Другой подход к расчету спектров, возникающих при многократных взаимодействиях, основан на решении транспортного уравнения и рассмотрен, например, в работах [5, 6].

Исследованию функции отклика детектора посвящен ряд работ, например [7–19]. Однако в большинстве из них не уделяют должного внимания возможности регистрации фотона в низкоэнергетической области после его комптоновского рассеяния в детекторе (регистрация фотона в "горбе потерь"). В работе [7] рассматривается формирование "горба потерь" без рассмотрения процес-

сов регистрации в других областях функции отклика детектора. В работе [8] упоминают об этой существенной составляющей функции отклика детектора. А.Н. Жуковский и др. [9] приводят формулу для расчета интенсивности указанной составляющей функции отклика детектора, однако обращено внимание на то, что формула не везде корректна. В работах [10–13] функция отклика детектора рассматривается при невысокой энергии падающего в детектор излучения (5–20 кэВ), где "горб потерь" смещен в низкоэнергетическую область и не является существенным. В работе [14] рассчитывают функцию отклика Ge-детектора, однако только в приближении угла комптоновского рассеяния излучения $\Theta = 180^\circ$.

В работах [15, 16] рассматривается формирование сигнала и фона, однако отсутствует математическое описание процессов, формирующих функцию отклика детектора.

Расчету функции отклика детектора с учетом "горба потерь" методом Монте-Карло посвящены наши работы [17–19], в которых также показана возможность расчета аналитического сигнала и фона в энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализе путем рассмотрения процессов переноса энергии не только в образце, но и в детекторе.

При использовании Si-детектора в областях энергий выше 30 кэВ существенной становится вероятность регистрации таких фотонов в "горбе потерь", что приводит к значительному увеличе-

нию фона в области малых энергий [17–19].

В работе [20] было сообщено о создании Si-детекторов с толщиной мертвого слоя 0.2 мкм для детектора с Au-электродом и 0.1 мкм для детектора с Pd-электродом; по всей видимости, детекторы с подобной толщиной мертвого слоя считаются в настоящее время высококачественными.

Для подавления горба потерь в гамма-области излучения применялись схемы [21, 22], в которых использовались сегментированные либо двухслойные Ge-детекторы и электронные схемы, работающие либо в режиме с режекцией, либо в режиме суммирования амплитуд одновременно пришедших импульсов.

Существенным недостатком Ge-детектора в рентгеновской области спектра 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 K_{α} и K_{β} флуоресцентных фотонов Ge [19].

Перспективными материалами для изготовления детекторов считаются AsGa и CdTe [23]. Недостатком этих детекторов по сравнению с Ge является удвоенное количество пиков потерь, соответствующих флуоресцентному излучению обоих входящих в детектор элементов, что в ряде случаев затрудняет расшифровку спектров. Возможно, это является одной из причин редкого использования подобных детекторов для детектирования рентгеновского излучения.

В рассматриваемых в данной работе детекторах для регистрации излучения использованы Si- и Ge-детекторы рентгеновского излучения (комбинированный Si-Ge детектор), расположенные непосредственно друг за другом, либо Si- и AsGa-детекторы (комбинированный Si-AsGa-детектор), либо Si- и CdTe-детекторы (комбинированный Si-CdTe-детектор), расположенные аналогично,

а также электронная схема, аналогичная по свойствам использованная в работах [21, 22]. Ближним к источнику ионизирующего излучения является тонкий (порядка 0.5 мм) Si-детектор, который выполняет роль основного детектора падающего излучения при энергиях излучения до 10–20 кэВ и роль детектора фотонов К-фотопотерь Ge- (либо AsGa-, либо CdTe-) детектора при более высоких энергиях (рис. 1). Подобный детектор (Si-Ge) был рассмотрен нами в работе [24] с точки зрения оценки параметров его функции отклика детектора.

Цель данной работы — расчет параметров функции отклика подобных комбинированных Si-Ge, Si-AsGa, Si-CdTe детекторов и оценка уровня фона для некоторых случаев применения подобного детектора в рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

В детекторе при регистрации фотона в рентгеновской области излучения происходят процессы фотопоглощения, когерентного и комптоновского рассеяний. 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 $Q_{det} = C \cdot E_{det}$ (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 $E_{det, out}$. Тогда оставшиеся в детекторе свободные электроны будут зарегистрированы как фотон с энергией $E'_{det} = E_{det} - E_{det, out}$. В этом случае при регистрации образуется пик потерь в результате фотопоглощения с последующей флуоресценцией и "горб потерь" в результате комптоновского рассеяния.

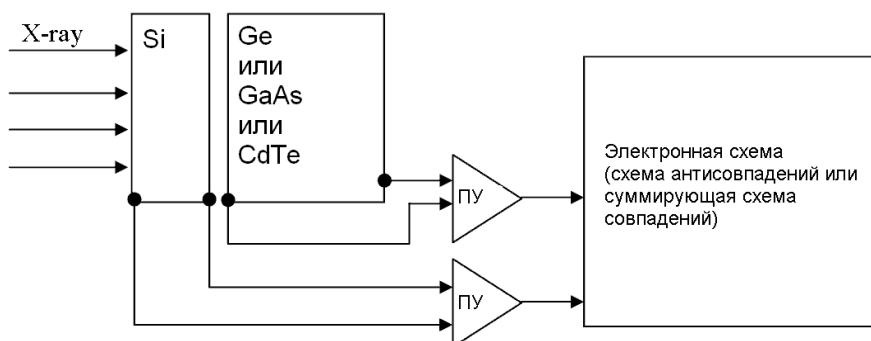


Рис. 1. Схема двухслойного рентгеновского комбинированного детектора

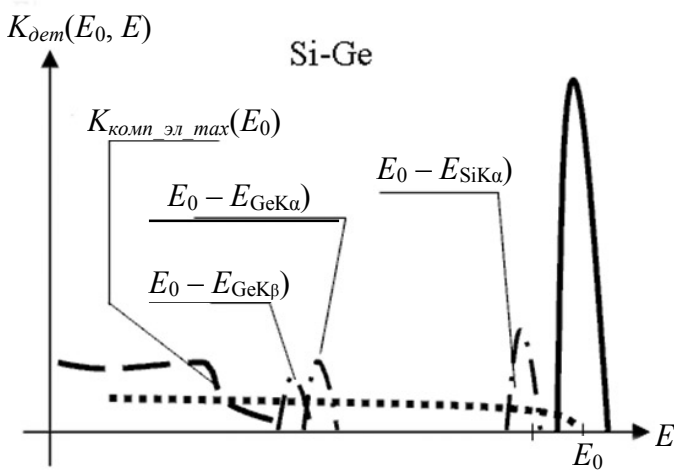


Рис. 5. Структура функции отклика комбинированного Si-Ge детектора.
 — пик полного поглощения,
 - · - · - К-фотопотери,
 - - - - горб потерь,
 ······ электронный хвост потерь

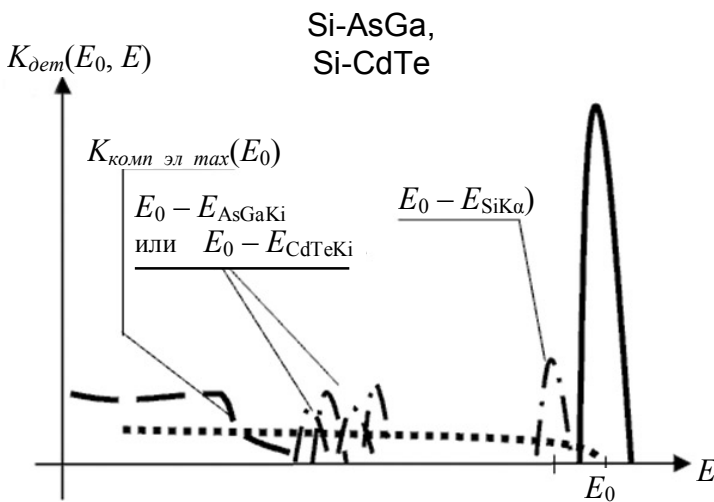


Рис. 6. Структура функции отклика комбинированного Si-AsGa- или Si-CdTe-детектора.
 — пик полного поглощения,
 - · - · - К-фотопотери,
 - - - - горб потерь,
 ······ электронный хвост потерь

Структура функции отклика AsGa- и CdTe-детектора (рис. 4) отличается от структуры функции отклика Ge-детектора в основном удвоенным количеством пиков фотопотерь, соответствующих как As, так и Ga. Также, подобно Ge-детектору, для AsGa-детектора вероятность регистрации в горбе потерь существенно меньше, чем для Si-детектора.

Структура функции отклика рассматриваемых в данной работе комбинированных детекторов приведена на рис. 5 для Si-Ge-детектора и на рис. 6 для Si-AsGa и Si-CdTe детекторов. Отличием является наличие пиков К-фотопотерь как Si, так и Ge или AsGa (или CdTe) (вероятностями регистрации в L-пике фотопотерь для комбинированных детекторов можно пренебречь, исходя из результатов расчетов). При этом интенсивность пиков фотопотерь в комбинированном детекторе существенно ниже, чем для однослойных Ge, AsGa или CdTe детекторов. Это связано с тем, что

флуоресцентные фотоны Ge (AsGa или CdTe), выход которых через входную плоскость детектора сопровождается появлением пика фотопотерь, эффективно поглощаются чувствительным слоем Si-детектора.

Результаты расчета вероятностей регистрации фотона в разных частях функции отклика детектора показаны на рис. 7, а, б, для Si-детектора с толщинами 6 и 0.6 мм соответственно. На рис. 7, в, г, приведены те же вероятности для Ge-детектора и для рассматриваемого комбинированного Si-Ge-детектора соответственно.

Как было показано в работах [18, 19] и может быть оценено по рис. 7, а, б, изменение толщины однослойного детектора влияет в основном на вероятности регистрации в пике полного поглощения $p_{эфф}$ и в горбе потерь $p_{компл}$. Расчетные вероятности регистрации в хвосте потерь, обусловленном выходом электронов высоких энергий, и пике фотопотерь практически не зависят от толщины.

детектор фотона;

– с запрещением работы схемы регистрации (схема антисовпадений).

Для комбинированного полупроводникового детектора рентгеновского излучения видны следующие преимущества по сравнению с однослойным (см. рис. 7, в, г, для Ge и Si-Ge детекторов; рис. 7, а, б, для AsGa и Si-AsGa детекторов; рис. 8 для CdTe и Si-CdTe детекторов соответственно):

– ненулевая вероятность регистрации в пике полного поглощения при высоких энергиях излучения, характерная для второго детектора;

– отсутствие провала эффективности при переходе через К-край поглощения Ge (или AsGa, или CdTe), поскольку, во-первых, провал эффективности обусловлен регистрацией фотона детектором в пике К-фотопоглотер, 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 [18, 19]. Это объясняется тем, что при высоких энергиях излучения регистрация фотонов происходит в основном во втором детекторе с большим Z;

– для комбинированного детектора при энергиях излучения, больших 40 кэВ, большая часть рентгеновских фотонов будет регистрироваться во втором детекторе с большим Z, что обуславливает высокую вероятность регистрации в пике полного поглощения, характерную для детекторов с большим Z в этой области.

Оценка толщины Si-детектора, устанавливаемого перед Ge, AsGa или CdTe детекторами, может быть выполнена следующим образом (рис. 8, 9):

– во-первых, эффективность Si-детектора на линиях флуоресценции Ge, AsGa, CdTe должна быть близка к единице, что обуславливает толщину Si-детектора не менее 0.2 мм для Si-AsGa и не менее 0.5 мм для Si-CdTe детектора;

– во-вторых, должен быть обеспечен спад эффективности Si-детектора в области энергий более 20–30 кэВ, в которой становится значимой регистрация излучения в горбе потерь вследствие комптоновского рассеяния. Это требование обуславливает максимальную толщину Si-детектора 1 мм. При большей толщине Si-детектора (рис. 8, в, рис. 9, г) начинает расти вероятность регистрации в горбе потерь.

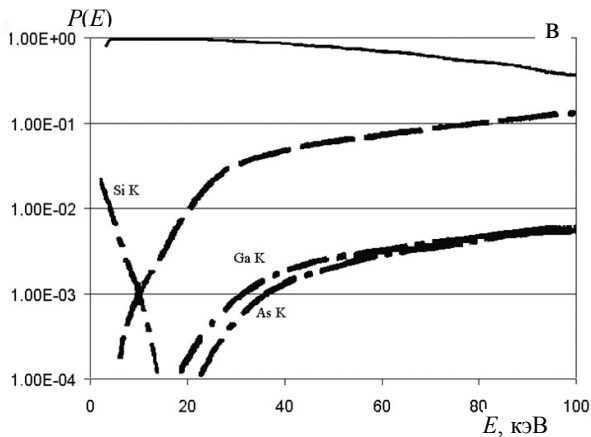
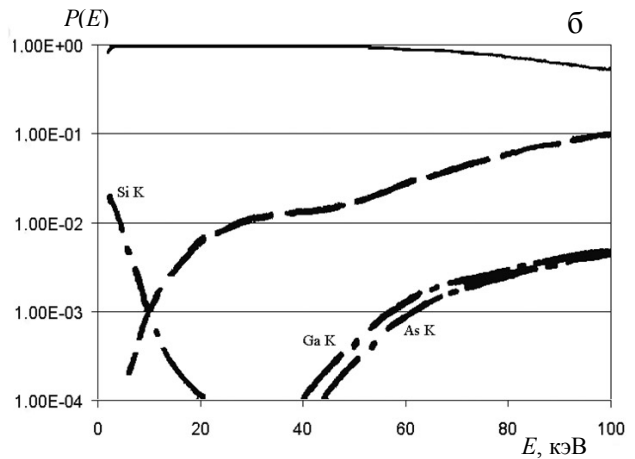
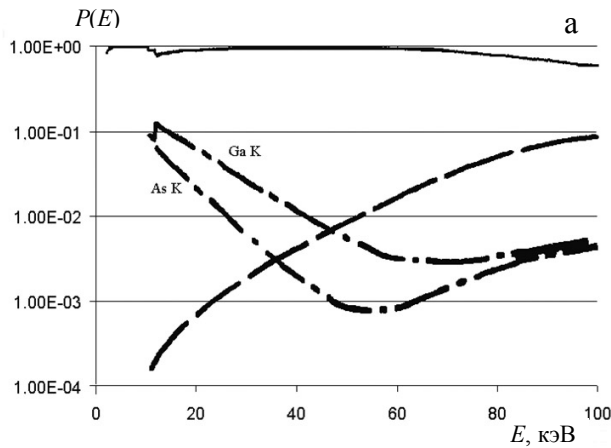


Рис. 8. Зависимости вероятностей регистрации фотона в различных частях функции отклика детектора от энергии фотона для AsGa- и Si-AsGa-детекторов.

а — AsGa-детектор толщиной 6 мм; б — комбинированный Si-AsGa-детектор с толщиной AsGa-детектора 5 мм и Si-детектором толщиной 0.6 мм; в — комбинированный Si-AsGa-детектор с толщиной AsGa-детектора 5 мм и Si-детектором толщиной 2 мм.

- вероятность регистрации фотона в пике полного поглощения (эффективность детектора $p_{эфф}$),
- · - · - вероятность регистрации в пике фотопоглотер $p_{ф}$,
- - - - вероятность регистрации в горбе потерь $p_{комп}$

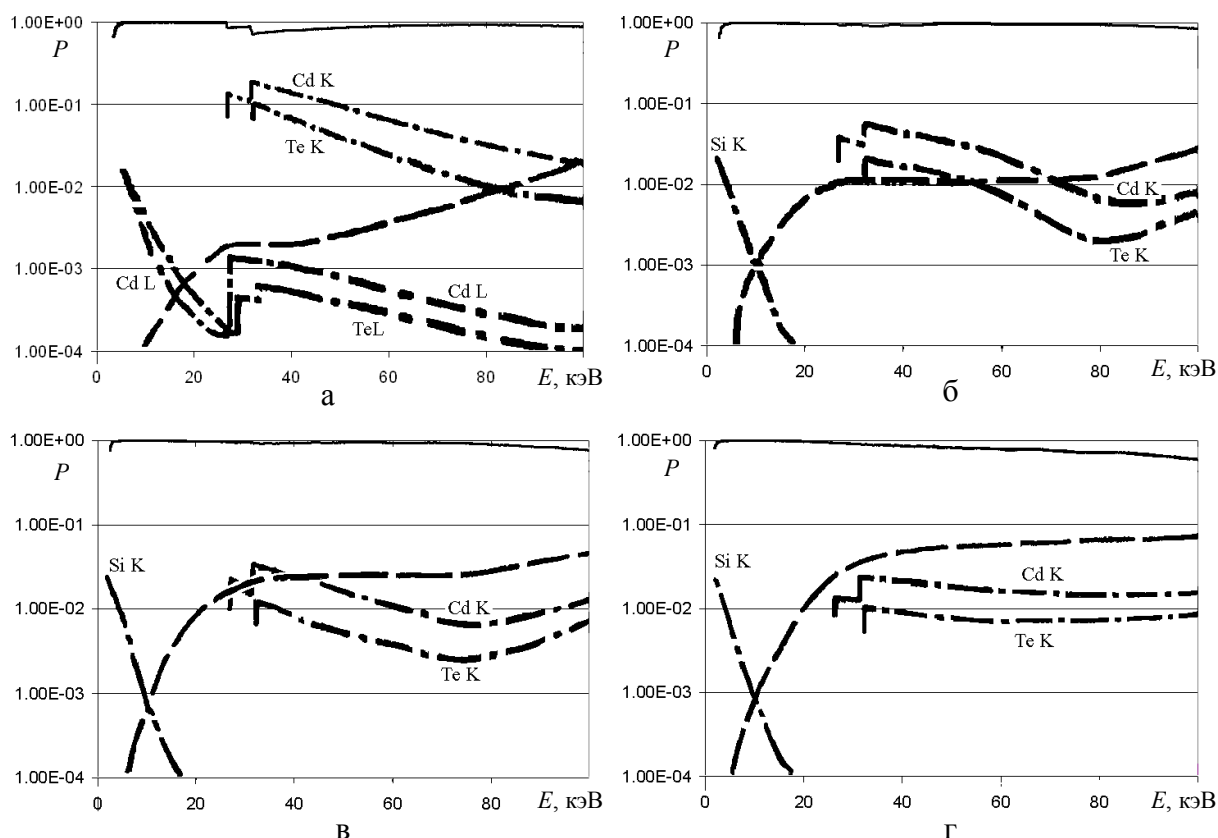


Рис. 9. Зависимости вероятностей регистрации фотона в различных частях функции отклика детектора от энергии фотона для CdTe- и Si-CdTe-детекторов.
а — CdTe-детектор толщиной 6 мм; б — комбинированный Si-CdTe-детектор с толщиной CdTe-детектора 5 мм и Si-детектором толщиной 0.5 мм; в — комбинированный Si-CdTe-детектор с толщиной CdTe-детектора 5 мм и Si-детектором толщиной 1 мм; г — комбинированный Si-CdTe-детектор с толщиной CdTe-детектора 5 мм и Si-детектором толщиной 2 мм.

— вероятность регистрации фотона в пике полного поглощения (эффективность детектора $P_{эфф}$),
- · - · - вероятность регистрации в пике фотопотерь $P_{ф}$,
- - - - вероятность регистрации в горбе потерь $P_{ком}$

РАСЧЕТНЫЙ УРОВЕНЬ СИГНАЛА И ФОНА ДЛЯ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Для моделирования спектров излучения, попадающего в детектор, использовалась модель работы [17], включающая в себя геометрический фактор спектрометра и однократные процессы взаимодействия излучения с образцом: флуоресценцию, когерентное и комптоновское рассеяния, тормозное излучение фото-, Оже- и комптоновских электронов, возникающие в образце. Спектр, регистрируемый детектором, рассчитывался как свертка спектра, попадающего в детектор, и функции отклика детектора.

Как было показано в работах [18, 19], в случае

использования рентгеновских трубок (с напряжением до 50 кВ) для возбуждения флуоресценции сигнал и фон слабо зависят от детектора, поскольку фон в основном обусловлен регистрацией рассеянного излучения. Подобный случай показан на рис. 10 для Si, Ge и Si-Ge детекторов с толщиной мертвого слоя порядка 0.1 мкм, Rh-рентгеновской трубки с напряжением 40 кВ и медного образца. Для этого случая уровень фона при использовании Si-Ge-детектора практически не отличается от уровня фона для Si-детектора.

На рис. 11 показан расчетный сигнал и фон для случая облучения медного образца излучением источника ^{109}Cd и регистрации излучения с помощью однослойных Si, Ge и комбинированного Si-Ge детекторов.

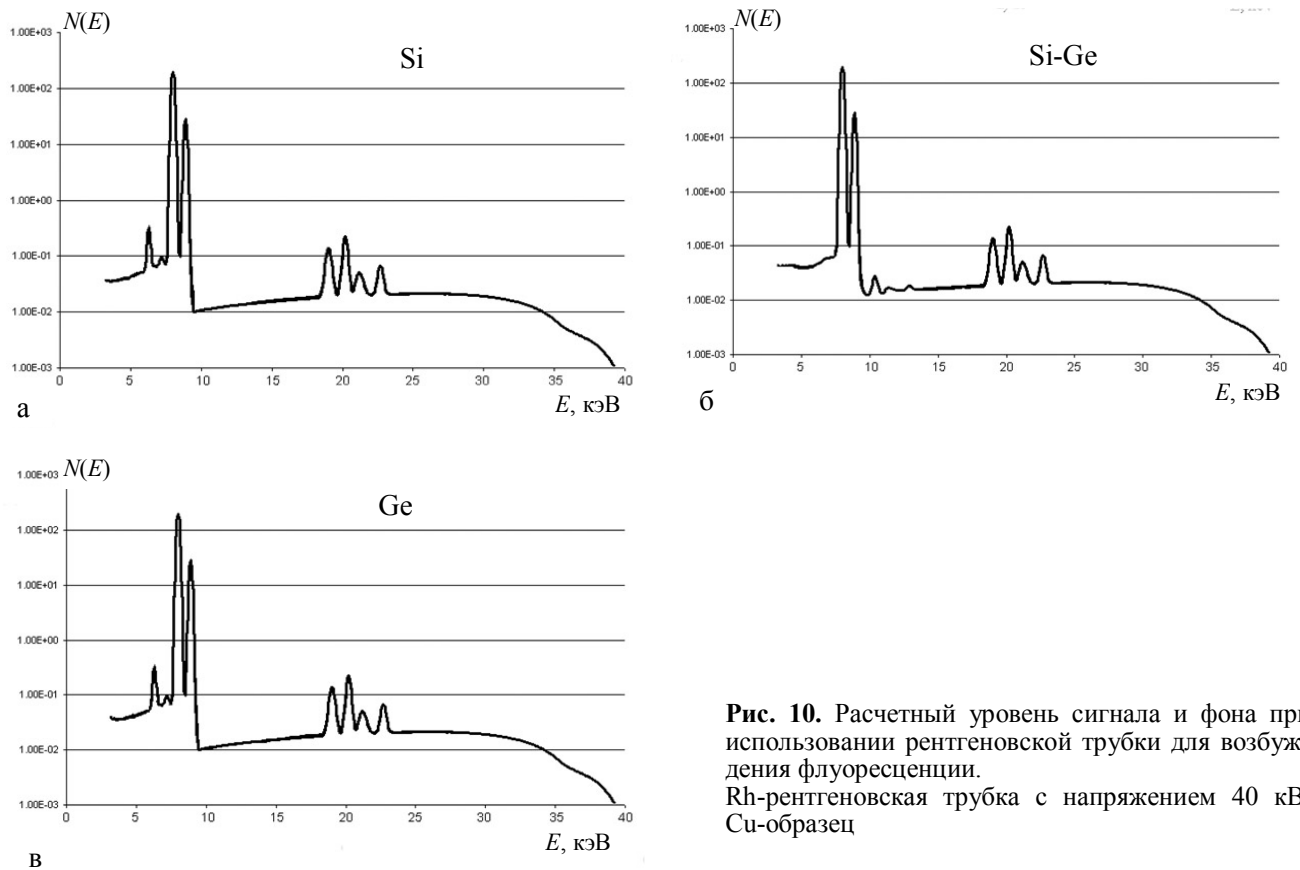


Рис. 10. Расчетный уровень сигнала и фона при использовании рентгеновской трубки для возбуждения флуоресценции. Rh-рентгеновская трубка с напряжением 40 кВ, Cu-образец

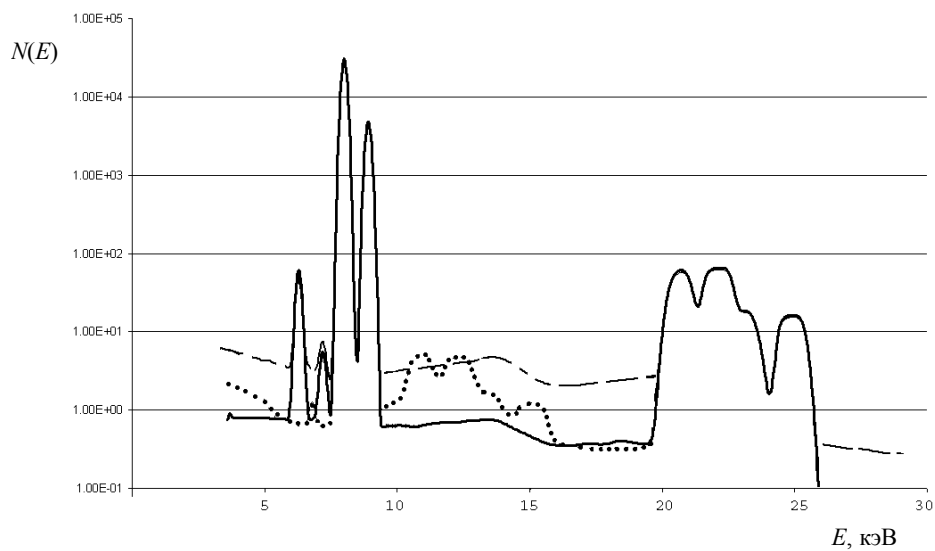


Рис. 11. Расчетный уровень сигнала и фона. Пунктирная линия — Si-детектор (толщина 5 мм); точечная линия — Ge-детектор (толщина 5 мм); непрерывная линия — комбинированный Si-Ge-детектор (толщина Si-детектора — 1 мм, толщина Ge-детектора — 5 мм). Источник излучения — ^{109}Cd . Образец — Cu

Из рисунка видно, что при использовании Si-детектора фон в области 2–20 кэВ будет повышен вследствие регистрации высокоэнергетического излучения (линия 88 кэВ источника ^{109}Cd), рассеянного когерентно и некогерентно образцом и зарегистрированного впоследствии детектором в горбе потерь [18, 19]. В случае использования Ge-детектора значительная часть фона в области энергий 10–15 кэВ обусловлена [19] регистрацией в пиках фотопотерь когерентно и некогерентно рассеянного образцом излучения (линии 22.1 кэВ и 24.8 кэВ источника ^{109}Cd). Рассматриваемый комбинированный Si-Ge-детектор в этих условиях имеет наименьший уровень фона вследствие более низкой вероятности регистрации в горбе потерь по сравнению с Ge-детектором и пиках фотопотерь по сравнению с Si-детектором. Подобный результат можно ожидать и от других комбинированных детекторов, поскольку их характеристики являются весьма близкими.

Следует отметить, что приведенная в данной работе модель хорошо описывает только высококачественные детекторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Doster J.M., Gardner R.P.* // X-ray spectrometry. 1982. V. 11. P. 173–180.
2. *He T., Gardner R.P., Verghese K.* // Nucl. Instr. Methods. 1990. V. A299. 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., Adams F.* // X-ray spectrometry. 1993. V. 22. P. 234–243.
5. *Fernandez J.E., Hubbell J.H., Hanson A.L., Spenser L.V.* // Radiation Physics and Chemistry. 1993. V. 41. P. 579–630.
6. *Fernandez J.E.* // X-ray spectrometry. 1992. V. 21. P. 57–68.
7. *Felsteiner J., Kahane S., Rosner B.* // Nuclear Instruments Methods. 1973. V. 118. P. 253–255.
8. *Keith H.D., Loomis T.C.* // X-ray spectrometry. 1976. V. 5. P. 93–103.
9. *Жуковский А.Н., Пшеничный Г.А., Мейер А.В.* Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
10. *Lowe B.G.* // Nuclear Instruments and methods in Physics Research. 2000. V. A439. P. 247–261.
11. *Papp T., Campbell J.L.* // X-ray spectrometry. 2001. V. 30. P. 77–82.
12. *Papp T.* // X-ray spectrometry. 2003. V. 32. P. 458–469.
13. *Scholze F., Procop M.* // X-Ray Spectrometry. 2009. V. 38. P. 312–321.
14. *Pekoz R., Can C.* // X-Ray Spectrometry. 2006. V. 35. P. 347–351.
15. *Nelsen J.A., McMorrow D.* Elements of modern X-ray physics. Wiley, 2001. 318 p.
16. *Vincze L., Janssens K., Vekemans B., Adams F.* // Spectrochimica Acta. Part B. 1999. V. 54. P. 1711–1722.
17. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Зузаан П., Эрденчимег Б.* // ЖАХ. 2004. Т. 59. С. 1171–1180.
18. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Зузаан П.* // ЖАХ. 2009. Т. 64. С. 511–520.
19. *Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S.* // X-ray spectrometry. 2010. V. 39. P. 41–51.
20. *Rossington C.S., Walton J.T., Jaklevic J.M.* Si(Li) detectors with thin dead layers for low energy X-ray detection. Lawrence Berkeley laboratory report LBL-29061, 1990.
21. Composite solid state radiation detector. UK patent 1233607, 1968.
22. *Кондратьев В.В., Соколов А.Д., Benoist A., Gatot-Garbe A., Lubczynsky P.* // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 4. С. 130–134.
23. *Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
24. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С.* // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 1. С. 39–45.
25. *Дирли Дж., Нортрон Д.* Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М.: Мир, 1966.
26. *Tihn T.P., Leroux J.* // Adv. X-ray spectrometry. 1979. V. 9. P. 85–91.
27. *Hubbell J.H., Veigele Wm.J., Braggs E.A. et al.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. V. 4. P. 471–538.
28. *Бахтияров А.В., Пшеничный Г.А.* // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение, 1972. Т. 11. С. 200–218.
29. *Vambynek W., Crasemann B., Fink R.W. et al.* // Review of modern physics. 1972. V. 44. P. 716–813.
30. *Рид С.* Электронно-зондовый микроанализ. М.: Мир, 1979. 423 с.

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск (Портной А.Ю., Сидорова Ю.И.)

НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск (Павлинский Г.В., Горбунов М.С.)

Контакты: *Портной Александр Юрьевич, portnoyalex@yandex.ru*

Материал поступил в редакцию 9.06.2011.

PROPERTIES OF THE TWO-LAYER COMPOSITE DETECTORS AND X-RAY ENERGY DISPERSIVE SPECTROMETERS, BASED ON THE DETECTORS

A. Yu. Portnoy¹, G. V. Pavlinsky², M. S. Gorbunov², Yu. I. Sidorova¹

¹*Irkutsk State University of Transport, Irkutsk*

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

The mathematical model for the two-layer Si-Ge, Si-AsGa, Si-CdTe X-ray energy dispersive detectors is proposed, based on X-ray radiation and photon transport in detector. Also the mathematical model of the energy dispersive spectrometer, based on the detector, is considered. Using Monte-Carlo method, the probabilities of the photon registration in a different parts of the detector response function are calculated. It is shown that using the Si detector as the first layer of the detector, Ge, AsGa or CdTe detector as the second layer, and time anti-coincidence scheme it is possible to design the detector with some advantages: with reduction of photo escape peak of the second detector and with high-energy efficiency the same as the second detector. It is shown that in some cases, if the two-layer detector is used, signal to background ration is increased.

Keywords: X-ray two-layer detector, detector response function, X-ray energy dispersive spectrometer, signal to background ratio