—ИССЛЕДОВАНИЯ—

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 обусловливает 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 процессов 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 попадающего 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 увеличению фона в области малых энергий [17-19].

В работе [20] было сообщено о создании Siдетекторов 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 Gедетекторы рентгеновского излучения (комбинированный Si-Ge детектор), расположенные непосредственно друг за другом, либо Si- и AsGaдетекторы (комбинированный Si-AsGa-детектор), либо Si- и CdTe-детекторы (комбинированный Si-CdTe-детектор), расположенные аналогично, а также электронная схема, аналогичная по свойствам использованным 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_{dem} , может быть полностью поглощен, преобразовавшись в поток электронов, которые в дальнейшем дадут импульс тока с зарядом $Q_{dem} = C \cdot E_{dem}$ — коэффициент пропорциональности) и будут (Cзарегистрированы аппаратурой как импульс, соответствующий *Е*_{дет}. В то же время фотон может быть рассеян веществом детектора и покинуть его с энергией *Е*_{дет оиt}. Тогда оставшиеся в детекторе свободные электроны будут зарегистрированы как фотон с энергией $E'_{dem} = E_{dem} - E_{dem out}$. 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





При оценке неполного сбора заряда [25] толщина мертвого слоя принималась равной 0.1 мкм, что соответствует параметрам высококачественных детекторов [20]. При таких толщинах мертвого слоя расчеты, приведенные в работах [17–19], становятся справедливыми.

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 точность этого метода становится вполне приемлемой для целей оценки свойств детекторов.

Вероятности взаимодействия фотона с веществом детектора описывались согласно работам [26] — для фотопоглощения, [27, 28] — когерентного и комптоновского рассеяний. Выход флуоресценции соответствует данным работы [29]. 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. При этом используется приближение Томсона—Уидингтона [30] и поправка на анизотропность электронов [10].

Так как результатам моделирования по методу Монте-Карло всегда присуща статистическая погрешность, то осуществляется 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.

При одновременной регистрации фотона в двух детекторах будем считать, что такое событие мо-

жет быть определено схемой временны́х совпадений, и электронная схема должна либо запретить регистрацию подобного события, либо зарегистрировать импульс с суммарной энергией. Очевидно, что при подобных реализациях спектры, регистрируемые обоими детекторами, должны быть совмещены по энергетической шкале. Подобная градуировка может быть проведена в области энергий, где эффективность кремниевого детектора начинает падать.

В работах [18, 19] показано, что изменение толщины детектора в основном влияет на вероятность регистрации фотона в пике полного поглощения $p_{3\phi\phi}$ и в горбе потерь, обусловленном выходом комптоновски рассеянного фотона $p_{комn}$. Вероятности регистрации в пике К-фотопотерь p_{ϕ} и в хвосте, обусловленном выходом электронов, $p_{3\pi}$ практически не зависят от толщины при размерах детекторов, характерных для полупроводниковых.

Также в этих работах показано, что наблюдается хорошее соответствие (± 30 %) расчетных и экспериментальных данных в областях функции отклика детектора, регистрация в которых обусловлена процессами переноса излучения (регистрация в пике полного поглощения, пиках потерь и горбе потерь), и удовлетворительное согласие для высококачественных детекторов в областях функции отклика детектора, в которых регистрация обусловлена процессами переноса электронов (хвост потерь). Это дает основание предполагать, что для рассматриваемого в данной работе двухслойного детектора модель будет давать хорошее согласие в областях, где фон обусловлен регистрацией в пиках потерь и горбе потерь.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА

На рис. 2 показана структура функции отклика

Si-детектора $K_{\partial em}(E_0, E)$, 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 в пике полного поглощения с энергией E_0 , в случае фотопоглощения с последующим выходом флуоресцентного фотона Si — в пике K-фотопотерь с энергией $E_0 - E_{K\alpha}$; 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 $E_{комп эл max}(E_0)$.

Структура функции отклика Ge-детектора (рис. 3) 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 обусловливает очень большую вероятность (порядка 20 %) регистрации фотона в пике Кфотопотерь. 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 K_{α} и K_{β} флуоресцентных квантов Ge.

– Вероятность регистрации в горбе потерь существенно меньше таковой для Si-детектора.





Структура функции отклика AsGa- и CdTeдетектора (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 Siдетектора.

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 Siдетектора.

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-Geдетектора 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_{3dd} и в горбе потерь p_{KOMR} . Расчетные вероятности регистрации в хвосте потерь, обусловленном выходом электронов высоких энергий, и пике фотопотерь практически не зависят от толщины.



Рис. 7. Зависимости вероятностей регистрации фотона в различных частях функции отклика детектора от энергии фотона.

а — Si-детектор толщиной 6 мм; б — Si-детектор толщиной 0.6 мм; в — Ge-детектор толщиной 5 мм; г — комбинированный Si-Ge-детектор с Si-детектором толщиной 0.5 мм и Ge-детектором толщиной 5 мм.

ероятность регистрации фотона в пике полного поглощения (эффективность детектора $p_{3\phi\phi}$),

---- вероятность регистрации в пике фотопотерь p_{ϕ} ,

— — — вероятность регистрации в горбе потерь *р*_{комп}

Это связано с тем, что потери вследствие выхода флуоресцентного фотона или электрона высокой энергии происходят в основном через входную поверхность детектора. Для Si-детектора вероятность $p_{3\phi\phi}$ регистрации фотона в пике полного поглощения и вероятность $p_{комп}$ регистрации в горбе потерь становятся примерно равными при энергии фотонов примерно 60–70 кэВ. Это результат примерного равенства сечений фотопоглощения и комптоновского рассяния в этой области энергий. Уменьшение толщины Si-детектора приводит к уменьшению в этом диапазоне энергий вероятности регистрации фотона как в пике полного поглощения, так и горбе потерь (см. рис. 7, а, б).

В рассматриваемых комбинированных Si-Ge, Si-AsGa, Si-CdTe детекторах 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 Ĝe, или AsGa, или в CdTe детекторах. При этом существует практически 100 % вероятность того, что флуоресцентный фотон Ge (или AsGa, или CdTe) детектора, выходящий через входную плоскость детектора (случай, когда для одиночного Ge-, или AsGa-, или CdTe-детектора фотон регистрируется в пике фотопотерь), будет зарегистрирован Si-детектором. Эти два события (регистрация вторым детектором фотона в пике фотопотерь и регистрация флуоресцентного фотона второго детектора кремниевым детектором) будут зарегистрированы как практически одновременные события, что предполагает два варианта работы электронной схемы, аналогичной приведенным в работах [20, 21]:

 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 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-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 [18, 19]. Это объясняется тем, что при высоких энергиях излучения регистрация фотонов происходит в основном во втором детекторе с бо́льшим Z; – для комбинированного детектора при энергиях излучения, больших 40 кэВ, большая часть рентгеновских фотонов будет регистрироваться во втором детекторе с бо́льшим Z, что обусловливает 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 обусловливает 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 обусловливает 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 AsGaдетектора 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 фотопотерь *p*_d,

 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 — СdТе-детектор толщиной 6 мм; б — комбинированный Si-CdTe-детектор с толщиной CdTeдетектора 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 $p_{3\phi\phi}$),
- · · вероятность регистрации в пике фотопотерь p_{ϕ} ,
- — вероятность регистрации в горбе потерь *р*_{комп}

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 ¹⁰⁹Cd и регистрации излучения с помощью однослойных Si, Ge и комбинированного Si-Ge детекторов.





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

Из рисунка видно, что при использовании Siдетектора фон в области 2-20 кэВ будет повышен вследствие регистрации высокоэнергетического излучения (линия 88 кэВ источника ¹⁰⁹Cd), рассеянного когерентно и некогерентно образцом и зарегистрированного впоследствии детектором в горбе потерь [18, 19]. В случае использования Geдетектора 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 ¹⁰⁹Cd). 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.
- *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. . 3vзаан П., Эрденчимег Б. // ЖАХ. 2004. Т. 59. C. 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) de-
- tectors 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 c
- 24. Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 1. С. 39-45.
- 25. Дирили Дж., Нортроп 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. Бахтиаров А.В., Пшеничный Г.А. // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л: Машиностроение, 1972. Т. 11. С. 200–218. 29. Bambynek W., Crasemann B., Fink R.W. et al. // Re-
- view of modern physics. 1972. V. 44. P. 716-813.
- 30. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ. M.: 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

¹Irkutsk State University of Transport, Irkutsk ²Applied 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 adventures: 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