

УДК 543.427

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

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОНА, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПЕРЕНОСОМ И СБОРОМ ЭЛЕКТРОНОВ В Si-ДЕТЕКТОРЕ

Оценено влияние мертвого слоя детектора на форму расчетной функции отклика Si-детектора. В области энергий, ниже чем энергия регистрируемого излучения, показана роль мертвого слоя детектора и рассмотрены особенности формы функции отклика детектора.

Кл. сл.: Si-детектор, функция отклика, неполный сбор заряда, мертвый слой, отношение сигнал/фон

ВВЕДЕНИЕ

Энергодисперсионные детекторы рентгеновского излучения на основе высокочистого или легированного литием Si и Ge широко применяются в спектроскопии рентгеновского и гамма излучений. Одним из важных параметров детектора является функция отклика детектора, представляющая собой вероятность регистрации рентгеновского фотона с энергией E_0 , попадающего в детектор, как фотона с энергией E .

Обычно для исследования функции отклика детектора используется метод Монте-Карло [1–7], хотя существуют и оценки, основанные на решении транспортных уравнений [8].

Расчету функции отклика детектора с учетом "горба потерь" методом Монте-Карло посвящены наши работы [9–12]. В этих работах также показана возможность расчета аналитического сигнала и фона в энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализе путем рассмотрения процессов переноса энергии в образце и детекторе.

В работе [13] мертвый слой детектора интерпретируется как область детектора, из которой заряд не полностью собирается вследствие меньшего, чем в основном проводнике, сопротивления и большего количества ловушек, связанных с обработкой поверхности полупроводника и напылением слоя электрода, что сопровождается меньшим временем жизни носителей заряда и одновременно меньшей напряженностью электрического поля.

Задача измерения мертвого слоя [14, 15] является важной в спектрометрии излучения заряженных частиц. Наиболее точный метод основан на использовании для этих целей пучков ускоренных частиц [16, 17]. В зависимости от способа изготовления и температуры толщина мертвого слоя Si(Li)-детектора может составлять как 300–500 мкм [18], так и 20–40 мкм [19]. В работе [20] было сообщено о создании Si-детекторов с толщи-

ной мертвого слоя 0.2 мкм (с Au-электродом) и 0.1 мкм (с Pd-электродом).

Выбор значения постоянной времени интегрирования τ формирующего усилителя также влияет на измеряемую толщину мертвого слоя [21]. Так, при температуре 300 К для Si(Li)-детектора увеличение времени τ от 0.5 до 2 мкс приводит к "уменьшению" толщины мертвого слоя в 1.2–1.5 раза.

Целью данной работы является дополнение математических моделей детектора [9–12] моделью неполного сбора заряда внутри мертвого слоя детектора и оценка влияния этого слоя на функцию отклика Si-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 $E_{\text{дет}}$, может быть полностью поглощен, преобразовавшись в поток электронов, которые в дальнейшем дадут импульс тока с зарядом

$$Q_{\text{дет}} = C \cdot E_{\text{дет}} \quad (1)$$

(C — коэффициент пропорциональности) и будут зарегистрированы аппаратурой как импульс, соответствующий $E_{\text{дет}}$.

В то же время фотон может быть рассеян веществом детектора (в результате комптоновского рассеяния, либо фотопоглощения с последующей флуоресценцией) и покинуть его с энергией $E_{\text{дет_out}}$. Тогда оставшиеся в детекторе свободные электроны будут зарегистрированы как фотон с энергией

$$E'_{\text{дет}} = E_{\text{дет}} - E_{\text{дет_out}} \quad (2)$$

В этом случае при регистрации образуется пик по-

тер в результате фотопоглощения с последующей флуоресценцией и горб потерь в результате комптоновского рассеяния.

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. Этот процесс для высококачественных детекторов является конкурирующим с процессом неполного сбора заряда.

Формула (2) также не является строгим законом — вблизи входной поверхности детектора заряд до некоторой глубины (глубина мертвого слоя) будет собираться не полностью из-за более интенсивной, чем в основном объеме детектора, рекомбинации носителей на центрах рекомбинации и захвата заряда ловушками, связанными с приповерхностными дефектами полупроводника. При таких процессах количество собранного заряда электронов и дырок может быть разным [13]. Из-за неполного сбора заряда при регистрации фотона внутри мертвого слоя фотон будет регистрироваться уже с энергией

$$E_{\text{det}}'' = (E_{\text{det}} - E_{\text{det_out}}) \cdot p_{\text{зар}}, \quad (3)$$

где $p_{\text{зар}}$ — относительное количество заряда, собранное в детекторе при некоторой глубине h события, приводящего к поглощению рентгеновского фотона и появлению электронов высокой энергии ($E_{\text{det_out}}$ в данном случае может быть как равным, так и не равным нулю). Функция $p_{\text{зар}}$ в общем случае должна изменяться от 0 на самой поверхности детектора до 1 в основном объеме детектора вдали от поверхности. Примеры $p_{\text{зар}}$, использованные в данной работе, приведены далее.

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 в работах: фотопоглощения — [22], когерентного и комптоновского рассеяния — [23, 24]. Выход флуоресценции взят согласно [25]. При описании выхода электронов использовалось приближение Томсона—Уидингтона [26] и поправка на анизотропность электронов [3].

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

На рис. 1 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 в пике полного поглощения с энергией E_0 ; в случае фотопоглощения с последующим выходом флуоресцентного фотона Si — в пике К-фотопотери с энергией $E_0 - E_{\text{Ка}}$; в случае выхода электрона высокой энергии из чувствительной области детектора — зарегистрирован 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 $E_{\text{komp_el_max}}(E_0)$. В случае регистрации фотона внутри мертвого слоя детектора заряд собирается неполностью и в дополнение к хвосту потерь, обусловленному выходом электронов, добавляется хвост, обусловленный неполным сбором заряда детектора (см. (3)). Хвост, обусловленный неполным сбором заряда,

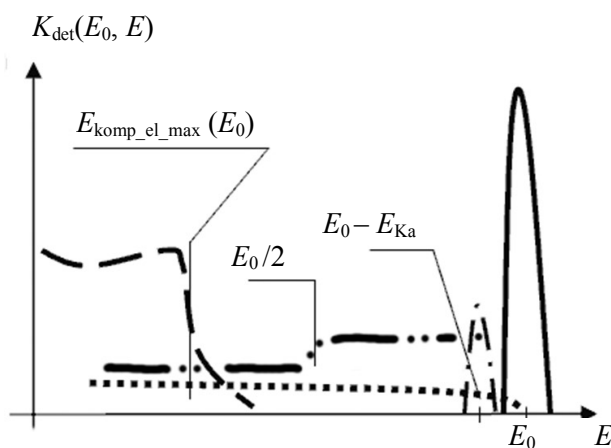


Рис. 1. Структура функции отклика Si-детектора. Непрерывная линия — пик полного поглощения; штрихпунктирная линия — К-фотопотери для Si-детекторов и К- и L-фотопотери для Ge-, AsGa-, CdTe-детекторов; пунктирная линия — горб потерь; точечная линия — электронный хвост потерь; линия (штрих—две точки) — хвост от неполного сбора заряда

может иметь скачок на половине энергии регистрируемого излучения, обусловленный разной толщиной мертвого слоя для электронов и дырок в том случае, если в приповерхностном слое по каким-либо технологическим причинам, связанным с обработкой поверхности, вероятности сбора заряда разных знаков существенно отличаются.

На рис. 2 представлена примененная для анализа функции отклика функция $p_{\text{зар}}$ сбора заряда внутри мертвого слоя толщиной $h_{\text{дл}}$ в зависимости от глубины h взаимодействия. В результате этого взаимодействия появились электроны высоких энергий, при дальнейшем торможении которых и

образуется заряд, в идеале пропорциональный энергии фотона. При подобной модели сбора заряда, если фотон регистрируется внутри мертвого слоя детектора толщиной $h_{\text{дл}}$, то заряд будет собран лишь частично по сравнению с тем, когда фотон регистрируется в основном объеме детектора (вдали от входной поверхности). Следствием этого процесса будет дополнительный хвост функции отклика с энергией, меньшей чем энергия пика полного поглощения, налагающийся на хвост потерь, обусловленный выходом электронов высоких энергий за пределы чувствительной области детектора.

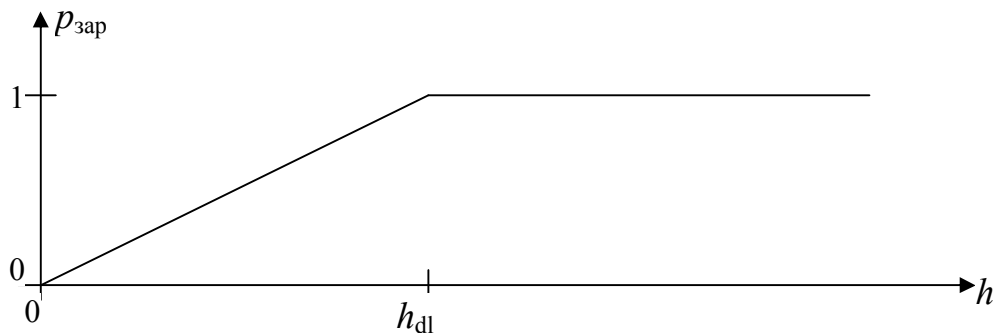


Рис. 2. Модельная зависимость эффективности сбора заряда $p_{\text{зар}}$ от глубины регистрации фотона h при толщине мертвого слоя детектора $h_{\text{дл}}$ при одинаковой эффективности сбора зарядов обоих знаков

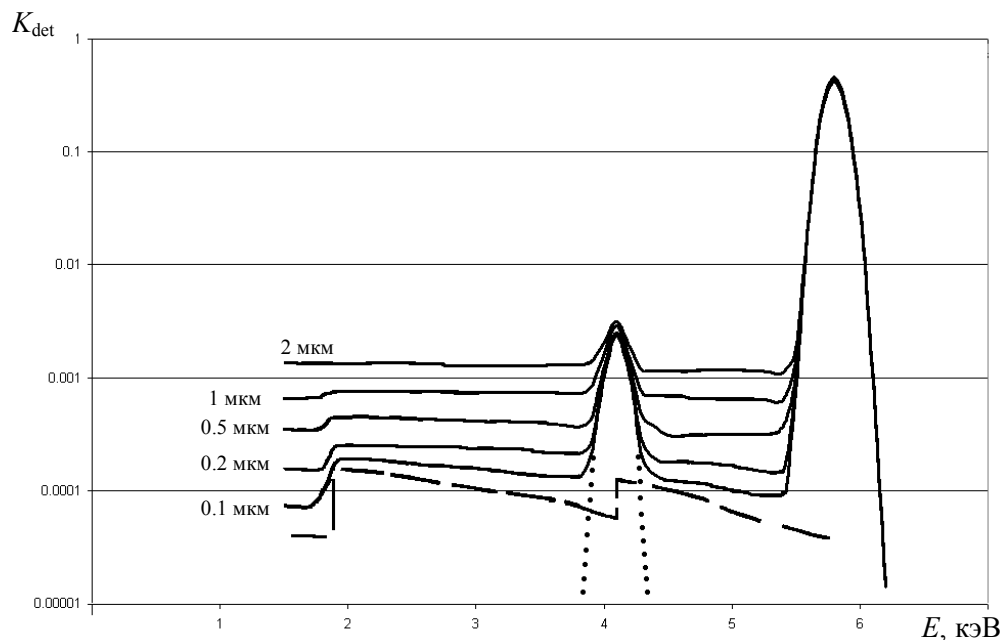


Рис. 3. Расчетная функция отклика детектора при энергии фотонов 5.8 кэВ и толщине мертвого слоя детектора 0.1–2 мкм (сплошные линии) и фон, обусловленный выходом электронов (пунктирная линия) и регистрацией фотонов в пике фотопотерь (точечная линия)

На рис. 3 представлена расчетная функция отклика детектора при энергии фотонов 5.8 кэВ при толщинах мертвого слоя 0.1–2 мкм и одинаковой эффективности сбора зарядов разных знаков. Из рисунка видно, что с уменьшением толщины мертвого слоя фон в области энергий, меньших энергии регистрируемой линии, из-за регистрации фотона в хвостах, обусловленных выходом электронов высоких энергий и неполным сбором заря-

да, уменьшается и при толщине мертвого слоя 0.1 мкм приближается к фону, обусловленному выходом электронов высоких энергий. По всей видимости, эта толщина мертвого слоя и является в настоящее время критерием "высококачественного" детектора и системы сбора информации спектрометра.

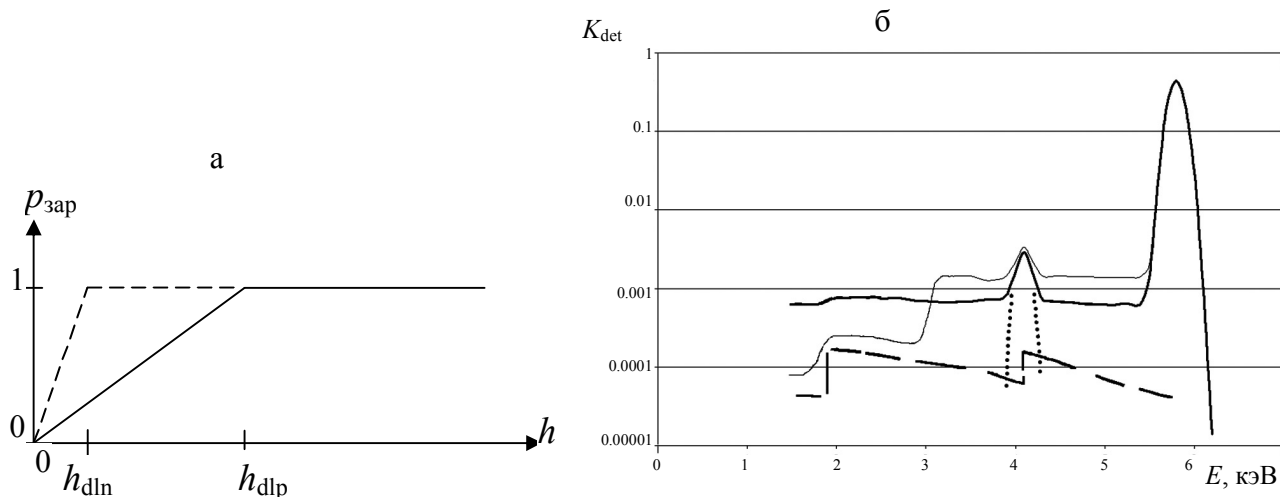


Рис. 4. Расчетная функция отклика детектора.

а — модельная зависимость эффективности сбора заряда $p_{\text{зар}}$ от глубины h регистрации фотона при толщинах мертвых слоев детектора h_{dln} и h_{dlp} при существенно разной эффективности сбора зарядов обоих знаков; б — расчетная функция отклика детектора при энергии фотонов 5.8 кэВ и толщине мертвого слоя детектора 1 мкм, и одинаковой толщине мертвого слоя для электронов и дырок (сплошная толстая линии), и при толщине мертвого слоя 0.1 мкм для электронов и 2 мкм для дырок (сплошная тонкая линия). Фон, обусловленный выходом электронов (пунктирная линия) и регистрацией фотонов в пике фотопотерь (точечная линия)

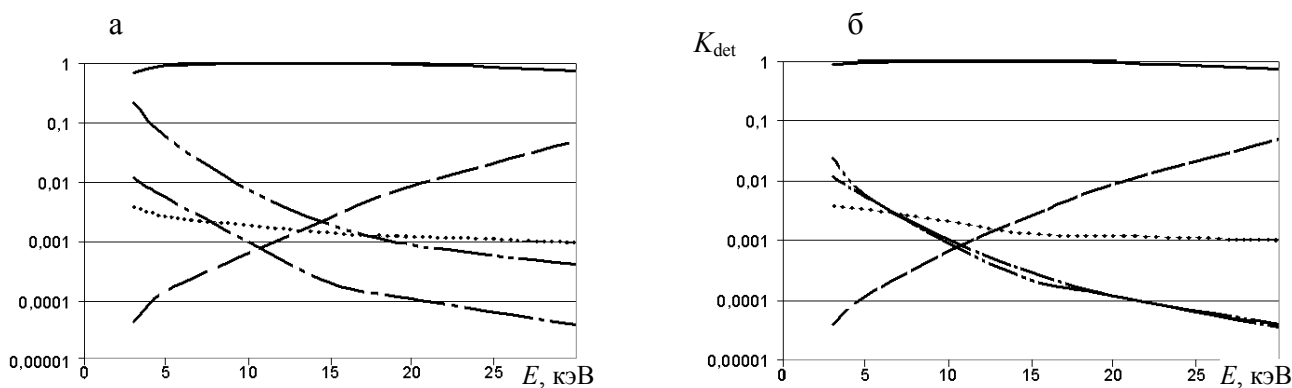


Рис. 5. Вероятности регистрации в разных частях функции отклика детектора при одинаковой толщине мертвого слоя для электронов и дырок.

Сплошная линия — вероятность регистрации в пике полного поглощения (эффективность детектора); пунктирная линия — вероятность регистрации в горбе потерь; точечная линия — вероятность регистрации в хвосте потерь, обусловленном выходом электронов высоких энергий из детектора; штрихпунктирная линия — вероятность регистрации в пике фотопотерь; линия (штрих—две точки) — вероятность регистрации в хвосте, обусловленном неполным сбором заряда. Толщина Si-детектора — 5 мм.

а — толщина мертвого слоя 1 мкм, б — толщина мертвого слоя 0.1 мкм

На рис. 4, а, представлены функции сбора заряда для случая, когда толщина мертвого слоя является существенно разной для электронов и дырок, например в случае разного количества ловушек одного и другого типа в приповерхностном слое. Для этого случая на рис 4, б, приведена рассчитанная функция отклика, для расчета которой приняты толщины мертвых слоев 0.1 и 2 мкм для электронов и дырок соответственно. В таком случае фон функции отклика детектора будет иметь скачок на половине энергии регистрируемого излучения.

На рис. 5 рассмотрены вероятности регистрации фотона в различных частях функции отклика детектора при толщине мертвых слоев детектора 1 мкм (а) и 0.1 мкм (б) при энергиях регистрируемых фотонов 3–30 кэВ. Из рисунка видно следующее.

– Вероятности регистрации фотона в хвосте потерь, обусловленном неполным сбором заряда, в данных диапазонах толщин мертвых слоев детектора пропорциональны толщине мертвого слоя детектора, поскольку при данных энергиях эти толщины мертвого слоя являются меньшими, чем длина свободного пробега фотона в Si.

– Поведение вероятности неполного сбора заряда похоже на поведение вероятности регистрации фотона в пике фотопотерь, поскольку обе вероятности быстро уменьшаются с увеличением энергии фотона из-за резкого увеличения длины свободного пробега фотона в кремнии при увеличении энергии фотона.

– Равенство вероятности регистрации в хвосте потерь, обусловленном выходом электронов высоких энергий, и вероятности регистрации в хвосте потерь, обусловленном неполным сбором заряда, наступает при энергии порядка 7 кэВ при толщине мертвого слоя 0.1 мкм и при энергии порядка 17 кэВ при толщине мертвого слоя 1 мкм. При энергии, выше указанной, начинает доминировать вероятность регистрации в хвосте потерь.

– При большой толщине мертвого слоя детектора в функции отклика детектора наблюдается некоторое уменьшение эффективности детектора (регистрации в пике полного поглощения), объясняемое достаточно большой толщиной дополнительного "кремниевого входного окна", обусловленного мертвым слоем.

– Вероятности регистрации в остальных частях функции отклика детектора (пике фотопотерь, горбе потерь, обусловленном выходом фотонов после комптоновского рассеяния в детекторе, хвосте потерь, обусловленном выходом электронов высоких энергий) остаются практически неизменными при изменении мертвого слоя детектора в указанных пределах и толщине детектора 5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Felsteiner J., Kahane S., Rosner B.* // Nuclear Instruments Methods. 1974. V. 118. P. 253–255.
2. *Keith H.D., Loomis T.C.* // X-ray spectrometry. 1976. V. 5. P. 93–103.
3. *Lowe B.G.* // Nuclear Instruments and methods in Physics Research. 2000. V. A439. P. 247–261.
4. *Papp T., Campbell J.L.* // X-ray spectrometry. 2001. V. 30. P. 77–82.
5. *Papp T.* // X-ray spectrometry. 2003. V. 32. P. 458–469.
6. *Scholz F., Procop M.* // X-Ray Spectrometry. 2009. V. 38. P. 312–321.
7. *Pekoz R., Can C.* // X-Ray Spectrometry. 2006. V. 35. P. 347–351.
8. Жуковский А.Н., Пиеничный Г.А., Мейер А.В. Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
9. Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Зузаан П., Эрденчимег Б. // ЖАХ. 2004. Т. 59. С. 1171–1180.
10. Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Зузаан П. // ЖАХ. 2009. Т. 64. С. 511–520.
11. *Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S.* // X-ray spectrometry. 2010. V. 39. P. 41–51.
12. Портной А.Ю. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 4. С. 13–23.
13. Дирнли Дж., Нортрон Д. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М.: Мир, 1966. 360 с.
14. *Eisberg R., Makino M., Cole R., Waddell C.N., Baker M., Jarmer J.J., Lee D.M., Thompson P.* // Nuclear instruments and methods. 1977. V. 146. P. 487–495.
15. Гуров Ю.Б., Исаков И.В., Карпунин В.С., Лапушкин С.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А. // ПТЭ. 2008. № 1. С. 67–71.
16. Алексеев Н.В., Бурымов Е.М., Вакулов П.В. и др. // Вестник МГУ, серия 3: физика, астрономия. 1973. № 5. С. 603.
17. Ильясов А.З., Мазитов Б.С. // ПТЭ. 1974. № 2. С. 60.
18. Азимов С.А., Муминов Р.А., Шамарзаев С.Х., Яфасов А.Я. Кремний-литиевые детекторы ядерных излучений. Ташкент: ФАН, 1981. 61 с.
19. Гуров Ю.Б., Катулина С.Л., Сандуковский В.Г., Юрковски Я. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 2–12.
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. Горнов М.Г., Гуров Ю.Б., Бер М.Н., Морохов П.В., Сандуковский В.Г. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 45–50.
22. *Tihn T.P., Leroux J.* // Adv. X-ray spectrometry. 1979. V. 9. P. 85–91.
23. *Hubbell J.H., Veigele Wm.J., Bragg E.A., Brown R.T., Cromer D.T., Howerton R.J.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. V. 4, N 3. P. 471–538.
24. Бахтияров А.В., Пиеничный Г.А. // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение, 1972. Т. 11. С. 200–218.
25. *Bambynek W., Crasemann B., Fink R.W., Freund H.-U.,*

- Mark H., Swift C.D., Price R.E., Venugopalarao P. // Review of Modern Physics. 1972 V. 44. P. 716–813.
26. Руд С. Электронно-зондовый микроанализ. М.: Мир, 1979. 423 с.

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

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

Контакты: Портной Александр Юрьевич,
portnoyalex@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 3.06.2011.

BACKGROUND PROPERTIES OF SI DETECTOR, DUE TO ELECTRON TRANSPORT AND CHARGE YIELD

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

¹*Irkutsk State University of Transport*

²*Applied Physics Institute at Irkutsk State University*

Influence of a detector dead layer on the form of the calculated function the Si detector was evaluated. Within the range of energies lower than the energy of the registered radiance, a role of a dead layer of the detector and features of the form of function of the response of the detector are considered.

Keywords: Si detector, detector response function, incomplete charge yield, dead layer, signal to background ratio