



УДК 539.1.074.5:620.179.152

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ
НЕОХЛАЖДАЕМОГО Si ПЛАНАРНОГО ДЕТЕКТОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
УСИЛИТЕЛЯ С ЕМКОСТНОЙ И РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ****ENERGY RESOLUTION OF THE SPECTROMETER BASED
ON UNCOOLED PLANAR Si DETECTOR AND PRE-AMPLIFIER WITH CAPACITIVE
AND RESISTIVE-CAPACITIVE FEEDBACK****¹А.С. Деев, ^{1,2}А.А. Мазиллов, ¹С.В. Наумов, ¹М.Ю. Шулика****¹O.S. Deiev, ^{1,2}A.A. Mazilov, ¹S.V. Naumov, ¹M.Yu. Shulika**¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина

NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology", 1 Akademicheskaya St, Kharkov, 61108, Ukraine

²Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г.Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: deev@kipt.kharkov.ua; alexey.mazilov@gmail.com; m_shulika@kipt.kharkov.ua

Ключевые слова: кремниевые планарные детекторы, энергетическое разрешение детектора, фактор Фано

Key words: silicon planar detectors, energy resolution of the detector, Fano factor

Аннотация. Представлены результаты измерений энергии излучения для разработанных в ННЦ ХФТИ одноканальных детектирующих систем на основе кремниевых неохлаждаемых планарных детекторов и спектрометрической считывающей электроники с предварительным усилителем двух типов: с емкостной и резистивно-емкостной обратной связью. В экспериментах применялись источники излучения ⁵⁵Fe, ²⁴¹Am, ⁵⁷Co и характеристическое рентгеновское излучение (ХРИ) элементов от Cu до Pb. Измерены значения FWHM в диапазоне $E_\gamma \sim 4\text{--}136$ кэВ.

Resume. It is shown the results of measurements of irradiation energy for developed in NSC KIPT single channel detection systems based on uncooled planar silicon detectors and spectrometric readout electronics with pre-amplifiers of two types: with capacitive and resistive-capacitive feedback. In the experiments there were used radiation sources ⁵⁵Fe, ²⁴¹Am, ⁵⁷Co and characteristic X-ray (CXР) of the elements from Cu to Pb. The values of the FWHM in the range $E_\gamma \sim 4\text{--}136$ keV were measured.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые полупроводниковые детекторы получили широкое распространение в спектрометрии мягкого рентгеновского излучения [1,2]. Значимое место занимают гамма-спектрометрические методы неразрушающего анализа, которые являются более экспрессными, дешевыми и доступными, чем разрушающий химический анализ, требуют меньшей подготовки персонала, проводящего измерения, и не производят каких-либо значительных изменений в состоянии исследуемого материала [3].

Важной динамической характеристикой, существенной для правильной интерпретации результатов измерений спектров рентгеновского излучения, является энергетическое разрешение спектрометра при различных энергиях рентгеновского излучения [4]. Поэтому продолжают исследования энергетического разрешения полупроводниковых рентгеновских спектрометров с различными типами детекторов [4-7].

В настоящей работе, представлены результаты измерений энергетического разрешения (FWHM) спектрометрической системы на основе герметизированного детектирующего модуля (неохлаждаемый Si PIN детектор) и зарядочувствительных усилителей двух типов: с емкостной (C) и резистивной (RC) обратной связью.

1. УСИЛИТЕЛИ С РЕЗИСТИВНО ЕМКОСТНОЙ (RC) И ЕМКОСТНОЙ (C) ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На Рис.1 показана схема классического зарядо-чувствительного усилителя, цепь обратной связи которого состоит из высокоомного резистора и конденсатора малой ёмкости. Основным достоинством этой схемы считается простота конструкции. К недостаткам следует отнести избыточный шум резистора обратной связи, большие габариты резистора обратной связи, малая стабильность по усилению заряда. На Рис.2 представлена схема зарядо-чувствительного усилителя со сбросом конденсатора обратной связи. Достоинства этой схемы: отсутствует резистор обратной связи, компактность, минимально низкий шум. Имеются также существенные недостатки: сложность реализации, специальные требования к спектрометрическому усилителю и амплитудному анализатору.

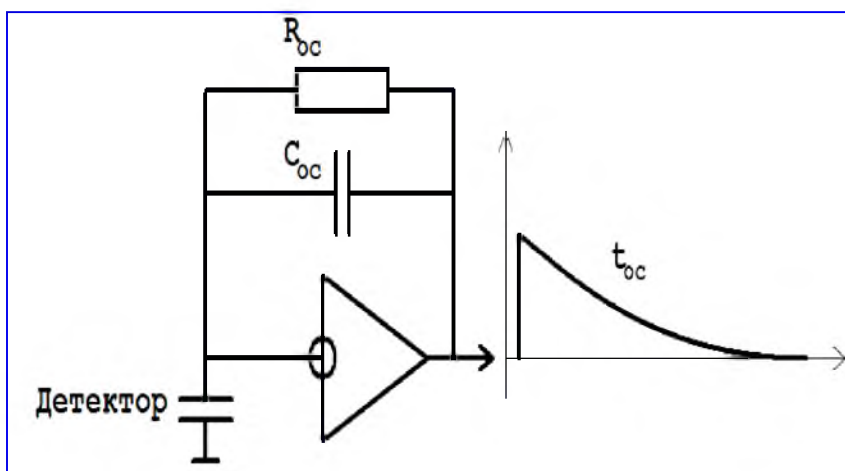


Рис. 1. Схема классического зарядо-чувствительного усилителя с резистивной (RC) обратной связью

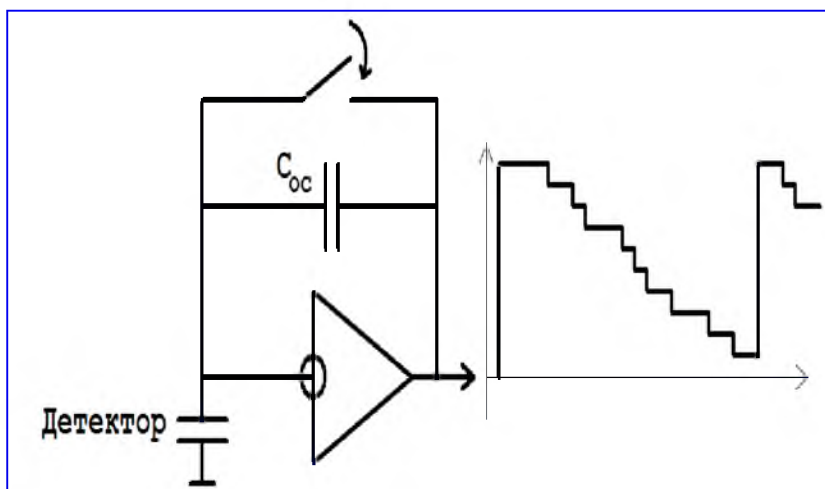


Рис. 2. Схема зарядо-чувствительного усилителя со сбросом конденсатора обратной связи – с емкостной (C) обратной связью

Разработанные и изготовленные в ННЦ ХФТИ герметизированные модули неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов [8] и считывающая электроника [9] показали высокую стабильность при использовании в экспериментах физики высоких энергий, ядерно-физических

экспериментах, в устройствах контроля концентрации элементов, в медицинских диагностических устройствах [10-12]. Спектрометрический канал на основе неохлаждаемого Si PIN детектора толщиной $t = 300 \mu\text{m}$ обеспечивает устойчивую регистрацию излучения в диапазоне энергий $E_\gamma = 5 \dots 150 \text{ кэВ}$. В [11] рассмотрены вопросы эффективности регистрации квантов различных энергий.

В настоящей работе измерения энергетических спектров выполнены в диапазоне энергий 3,7-136 кэВ с помощью источников излучения ^{241}Am , ^{57}Co , ^{55}Fe и характеристического излучения (ХРИ), возбуждаемого для мишеней Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Ni, Mo, Sn, Ag, Pb. Определено энергетическое разрешение Si детектора (FWHM – полная ширина на полувысоте пика гамма линий) в нормальных условиях. Обработка и разделение линий проведена в Origin 8.

2. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И FWHM ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ С РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОЙ (RC) ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

На Рис.3 представлены экспериментальные спектры для источников гамма-излучения ^{241}Am (ОСГИ – кривая 1, в металлическом корпусе – кривая 2), полученные Si детектором толщиной $300 \mu\text{m}$. Спектры гамма излучения состоят из набора линий (пики полного поглощения) и комптоновского распределения.

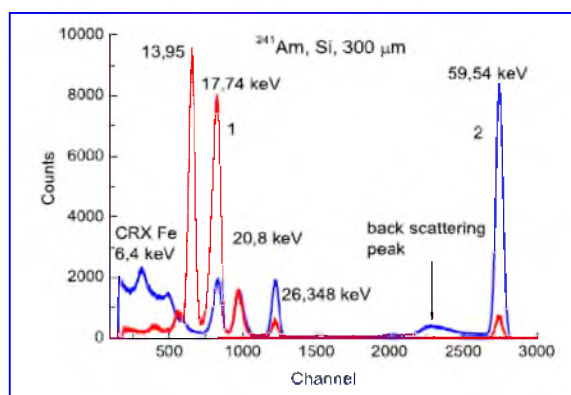


Рис.3. Экспериментальные спектры для источников гамма-излучения ^{241}Am (ОСГИ – кривая 1, в металлическом корпусе – кривая 2), полученные Si детектором толщиной $300 \mu\text{m}$.

На Рис.4 представлены спектры ХРИ для Fe, Pb и Ag. Для Fe линии K_α и K_β не разделены, для Pb измерен L триплет, для Ag линии K_α и K_β разделены.

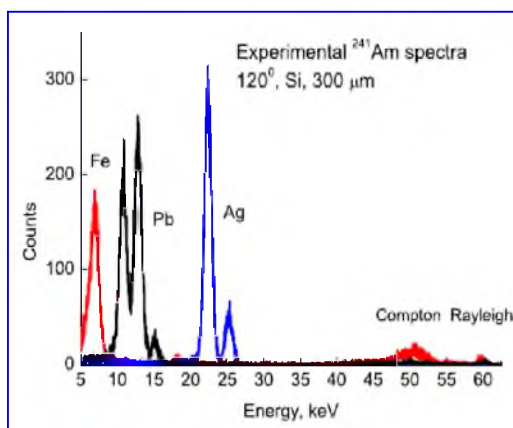


Рис.4. Экспериментальные спектры ХРИ для Fe, Pb и Ag.



На Рис.5 представлен спектр ХРИ от Cu, линии K_α и K_β не разделены, но отчетливо заметна асимметрия пика ХРИ.

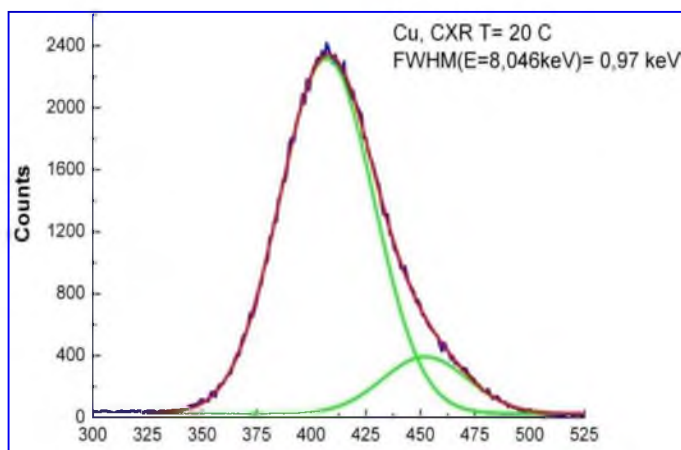


Рис.5. Спектр ХРИ от Cu, линии K_α и K_β не разделены, но отчетливо заметна асимметрия пика ХРИ.

На Рис.6 представлен спектр излучения от источника ^{55}Fe , линии K_α и K_β также не разделяются, заметна асимметрия пика.

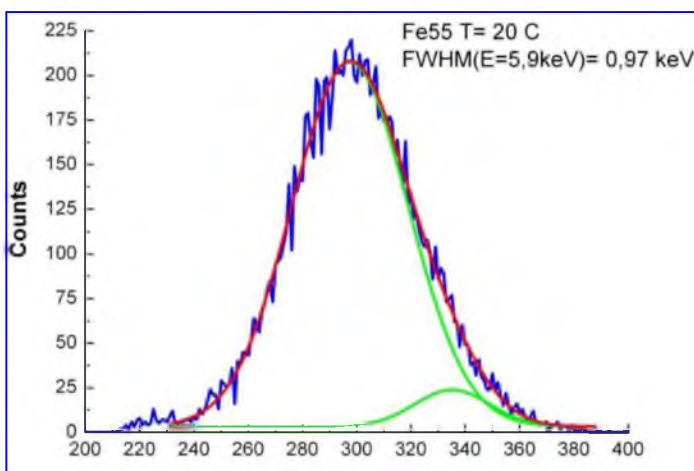


Рис.6. Спектр излучения от источника ^{55}Fe , линии K_α и K_β не разделяются, заметна асимметрия пика.

Результаты по измерению энергетического разрешения для спектрометрической системы с резистивно-емкостной обратной связью (RC) представлены в Табл.1. FWHM в составило 0,97-1,21 кэВ (см. Табл.1), а край фоновых шумов ≤ 2 кэВ. Ошибка определения полуширин не превышала 1-2%. Отметим, что зависимость энергетического разрешения от энергии рентгеновских квантов при комнатной температуре выражена слабо.

Таблица 1. Значения FWHM для спектрометрической системы с резистивно-емкостной обратной связью (RC)

E, keV	3.69	5.9	8.046	15.77	17.47	25.27	26.34	59.54	122.06	136.47
FWHM	0.99	0.97	0.97	0.99	0.98	1.02	1.05	1.10	1.19	1.21

3. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И FWHM ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ С ЕМКОСТНОЙ (С) ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Изготовлен и оптимизирован экспериментальный образец спектрометрической системы на основе герметизированного детектирующего модуля (неохлаждаемый Si PIN детектор с током утечки 6 пА при температуре 25°C) и зарядочувствительного усилителя с емкостной обратной связью (С).

На Рис.7 показан экспериментальный спектр излучения для источника ^{241}Am (ОСГИ), полученный Si детектором толщиной 300 мкм. Выделены изолированные монолинии с энергией 13.9, 26. 34 и 59.54 кэВ.

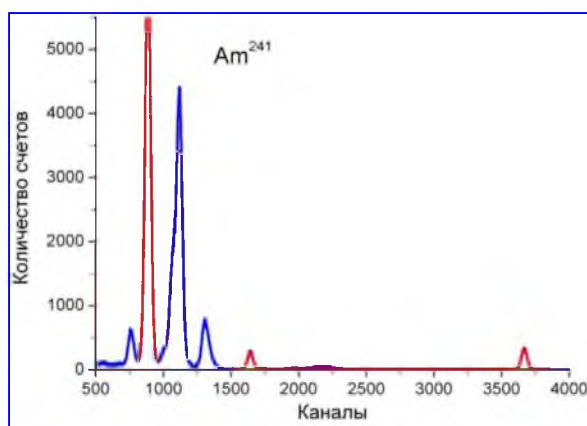


Рис.7. Экспериментальный спектр излучения для источника ^{241}Am (ОСГИ), полученный Si детектором толщиной 300 мкм.

На Рис.8 представлен спектр ХРИ от Cu, линии K_α и K_β не разделены, но асимметрия пика ХРИ выражена более отчетливо, чем на Рис.5.

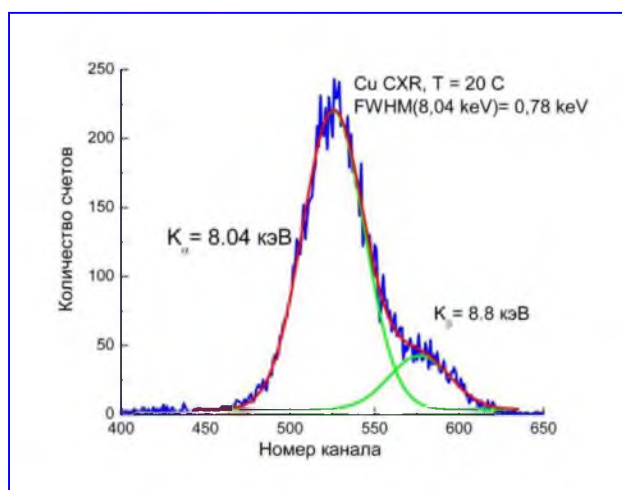


Рис.8. Спектр ХРИ от Cu, линии K_α и K_β не разделены.

На Рис.9 представлен спектр излучения от источника ^{55}Fe . Полученный результат сравним с аналогичным результатом [6].

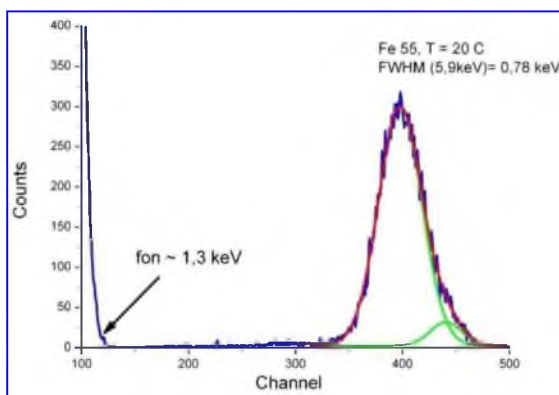


Рис.9. Спектр излучения от источника ⁵⁵Fe.

Результаты по измерению энергетического разрешения для спектрометрической системы с емкостной обратной связью (С) представлены в Табл. 2. FWHM в составило 0,7-0,79 кэВ, а край фоновых шумов ≤1,3 кэВ. Энергетическое разрешение слабо зависит от энергии квантов.

Таблица 2. Значения FWHM для спектрометрической системы с емкостной обратной связью (С)

E, keV	5.9	8.04	8.63	13.9	17.47	26.34	59.54
FWHM	0.78	0.70	0.71	0.76	0.75	0.77	0.79

4. РАЗДЕЛЕНИЕ ФАКТОРА ФАНО ДЕТЕКТОРА И ШУМОВ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА

На Рис.10 показана зависимость энергетического разрешения спектрометрического тракта (FWHM), измеренного для спектрометрических систем с зарядочувствительными усилителями двух типов с резистивно-емкостной (RC) и емкостной (С) обратной связью.

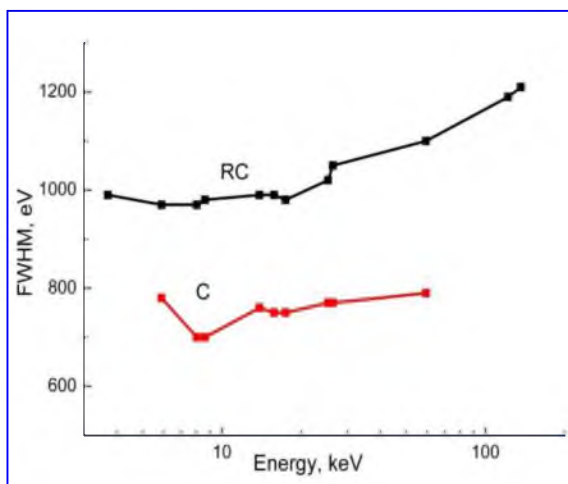


Рис.10. Зависимость энергетического разрешения спектрометрического тракта (FWHM), измеренного для резистивно-емкостной (RC) и емкостной (С) обратной связи.

Разрешение спектрометра можно представить в виде квадратного корня из суммы квадратов разрешения электроники E_{el} и фактора Фано [4]:

$$FWHM = \sqrt{(FWHM)_{el}^2 + 2.35^2 \cdot F \cdot \omega \cdot E}$$



Математическими расчетами можно разделить величины E_{el} и фактора Фано. На Рис.11 эти величины представлены как FWHM electronic для двух типов обратной связи и FWHM Fano.

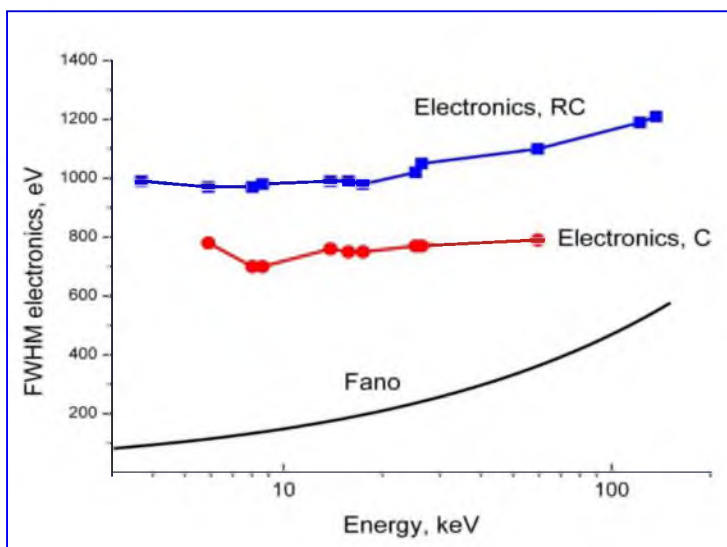


Рис.11. Величины FWHM electronic для двух типов обратной связи и FWHM Fano (нижняя кривая).

Нижняя кривая рассчитана как $FWHM = 2.35 \cdot \sqrt{F \cdot w \cdot E_\gamma}$, $w = 3.63$ eV, $F = 0.11$ (F – фактор Фано), E_γ – энергия квантов. Вклад шумов электроники для RC ~ 1000 eV, для C обратной связи ~ 750 eV.

Как можно видеть, в нашем случае для Si PIN детекторов при комнатной температуре квадрат фактора Фано значительно меньше квадрата шумов электроники. С этим обстоятельством связана слабая зависимость энергетического разрешения от энергии квантов. Аналогичные зависимости получены например, в [6,7].

Выводы

Представлены экспериментальные результаты измерений энергии излучения, полученные на разработанных в ННЦ ХФТИ экспериментальных образцах детектирующих систем на основе неохлаждаемых Si PIN детекторов.

Проведены измерения в диапазоне энергий квантов $E_\gamma = 3-140$ кэВ. Измерены энергетические разрешения FWHM и предельный уровень шумов для спектрометрических систем с зарядочувствительными усилителями двух типов: с резистивно-емкостной (RC) и емкостной (C) обратной связью.

Энергетическое разрешение (FWHM) детектора с усилителем с резистивно-емкостной обратной связью в указанном диапазоне энергий изменяется с увеличением энергии квантов с 0.97 до 1.21 кэВ. Уровень шумов спектрометрической системы не превышает 2 кэВ.

Результаты измеренного энергетического разрешения с усилителем с емкостной обратной связью находились в диапазоне 0,71-0,77 кэВ для $E_\gamma = 5-60$ кэВ, что подтверждает высокие характеристики спектрометрической системы. Уровень шумов системы измерен на уровне $\leq 1,37$ кэВ.



Показано, что при комнатной температуре квадрат фактора Фано значительно меньше квадрата шумов электроники. С этим обстоятельством связана слабая зависимость энергетического разрешения от энергии квантов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-12-10019).

Список литературы

1. Kowalski E. Nuclear electronics, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1970. In Russian translation: Е. Ковальский. Ядерная электроника, – М.: Атомиздат., 1972. – 360 с.
2. Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
3. Дуглас Райлли, Норберт Энслин, Хэйстингс Смит, Сара Крайнер. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов // Пер. с англ.– М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 2000. – 720 с.
4. J. Morse. Energy resolving semiconductor detectors for X-ray spectroscopy // <http://www.esrf.eu/files/live/sites/www/files/Instrumentation/friday-lectures-slides/ESRFtalk201002EDX-Systems.pdf>
5. Leonardo Abbene and Gaetano Gerardi. High Resolution X-Ray Spectroscopy with Compound Semiconductor Detectors and Digital Pulse Processing Systems // <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/27337.pdf>
6. Hua Feng, Philip Kaaret, Hans Andersson. Double-layer silicon PIN photodiode X-ray detector for a future X-ray timing mission // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006. V. 564. Pp. 347–351.
7. K. Mathieson, R. Bates, G.M. Iles, S. Manolopoulos et al. Simulated and experimental results from a room temperature silicon X-ray pixel detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001. V. 460. Pp.191–196.
8. G.P. Vasilyev, V.K. Voloshin, S.K. Kiprich et al. Encapsulated modules of silicon detectors of ionizing radiation // Problems of atomic science and technology, 2010. № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). Pp. 200-204.
9. V.I. Kulibaba, N.I. Maslov, S.V. Naumov, V.D. Ovchinnik, I.M. Prokhorets. Readout electronics for multichannel detectors // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.:NPI., 2001. №5(39), Pp. 177-179.
10. G.P. Vasiliev, V.K. Voloshyn O.S. Deiev, A.A. Mazilov et al. Radiation dose determination by dual channel spectrometr in energy range 0.005...1 MeV // Problems of atomic science and technology. 2012. №4 (80). Series: Nuclear Physic Investigations (59). p. 205-209.
11. G.L. Bochek, O.S. Deiev, N.I. Maslov, V.K. Voloshyn. X-ray lines relative intensity depending on detector efficiency, foils and cases thickness for primary and scattered spectra// Problems of atomic science and technology, 2011. №3 (73). Series: Nuclear Physic Investigations (55). p. 42-49.
12. G.P. Vasiliev, V.K. Voloshyn, O.S. Deiev et al. Measurement of Radiation Energy by Spectrometric Systems Based on Uncooled Silicon Detectors. // Journal of Surface Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Vol. 8. No. 2. pp. 391–397

References

1. E. Kowalski. Nuclear electronics, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1970. In Russian translation: E. Kowalski. Nuclear electronics, – М.: Atomizdat. – 1972. – 360 p.
2. Y.K. Akimov, O.V. Ignatiev, A.I. Kalinin, V.F. Kushniruk. Semiconductor detectors in experimental physics. – М.: Energoatomizdat. – 1989. – 344 p.
3. Douglas Reilly, Norbert Ensslin, Hastings Smith, Sarah Krayner. Passive nondestructive analysis of nuclear materials // Transl. from eng.– Moscow: ZAO "Publisher BINOM". – 2000. – 720 p.
4. J. Morse. Energy resolving semiconductor detectors for X-ray spectroscopy // <http://www.esrf.eu/files/live/sites/www/files/Instrumentation/friday-lectures-slides/ESRFtalk201002EDX-Systems.pdf>
5. Leonardo Abbene and Gaetano Gerardi. High Resolution X-Ray Spectroscopy with Compound Semiconductor Detectors and Digital Pulse Processing Systems // <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/27337.pdf>



6. Hua Feng, Philip Kaaret, Hans Andersson. Double-layer silicon PIN photodiode X-ray detector for a future X-ray timing mission // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006. V 564. Pp.347–351
7. K. Mathieson, R. Bates, G.M. Iles, S. Manolopoulos et al. Simulated and experimental results from a room temperature silicon X-ray pixel detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001. V. 460. Pp.191–196.
8. G.P. Vasilyev, V.K. Voloshin, S.K. Kiprich et al. Encapsulated modules of silicon detectors of ionizing radiation // Problems of atomic science and technology, 2010. No 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). Pp. 200-204.
9. V.I. Kulibaba, N.I. Maslov, S.V. Naumov, V.D. Ovchinnik, I.M. Prokhorets. Readout electronics for multichannel detectors // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.:NPI., 2001. №5(39), Pp. 177-179.
10. G.P. Vasiliev, V.K. Voloshyn O.S. Deiev, A.A. Mazilov et al. Radiation dose determination by dual channel spectrometr in energy range 0.005...1 MeV // Problems of atomic science and technology, 2012. №4 (80). Series: Nuclear Physic Investigations (59). Pp. 205-209.
11. G.L. Bochek, O.S. Deiev, N.I. Maslov, V.K. Voloshyn. X-ray lines relative intensity depending on detector efficiency, foils and cases thickness for primary and scattered spectra // Problems of atomic science and technology, 2011. №3 (73). Series: Nuclear Physic Investigations (55). p. 42-49.
12. G.P. Vasiliev, V.K. Voloshyn, O.S. Deiev et al. Measurement of Radiation Energy by Spectrometric Systems Based on Uncooled Silicon Detectors. // Journal of Surface Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014. V. 8. No. 2. Pp. 391–397