



УДК 539.1.074.55:620.179.152

**ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ Si ДЕТЕКТОРОВ
И Gd КОНВЕРТЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ****DETECTION SYSTEM BASED ON Si DETECTORS AND Gd CONVERTER
FOR THERMAL NEUTRONS REGISTRATION****А.С. Деев¹, С.К. Киприч¹, Г.П. Васильев¹, М.Ю. Шулика¹, А.А. Мазиллов²
O.S. Deiev¹, S.K. Kiprich¹, G.P. Vasiliev¹, M.Yu. Shulika¹, A.A. Mazilov²**

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; m_shulika@kipt.kharkov.ua; alexey.mazilov@gmail.com

Аннотация

Выполнена регистрация тепловых нейтронов с помощью двух планарных Si детекторов: с конвертером нейтронов из естественного металлического Gd и без конвертера. Для получения тепловых нейтронов использовался ²³⁹Pu-Be(α ,n) источник быстрых нейтронов с парафиновым замедлителем. Регистрировались конверсионные электроны ядерной реакции Gd(n, γ)Gd. Фоновое гамма излучение измерено Si детектором без слоя Gd.

Abstract

The thermal neutrons were recorded with the aid of two planar Si detectors: with a neutron converter from natural metallic Gd and without a converter. To obtain thermal neutrons, we used a ²³⁹Pu-Be(α , n) fast neutron source with paraffin moderator. The conversion electrons of the nuclear reaction Gd(n, γ) Gd were registered using Gd-Si detector. The background gamma radiation was measured by a Si detector without a Gd layer.

Ключевые слова: кремниевые планарные детекторы, Gd конвертер, тепловые нейтроны, электроны конверсии.

Keywords: silicon planar detectors, Gd converter, thermal neutrons, conversion electrons.

Введение

Перспективность регистрации тепловых нейтронов с помощью полупроводниковых Si детекторов и конвертера из Gd показана в работах [1-3]. Гадолиний имеет наибольшее сечение захвата тепловых нейтронов (до 300 000 барн) [2,3].

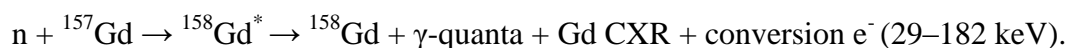
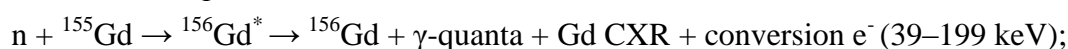
Работа продолжает исследования последних лет в ННЦ ХФТИ по регистрации тепловых нейтронов с помощью планарных Si детекторов с конвертером нейтронов из естественного металлического Gd. Были проведены моделирование замедления нейтронов и выхода ядерной реакции захвата тепловых нейтронов Gd(n, γ)Gd [4,5]. Разработаны герметизированные модули для регистрации излучений [6,7] и изучены особенности регистрации излучений Si pin детекторами [8,9]. В [10] экспериментально измерялись электроны конверсии и ХРИ Gd системой Gd-Si детектор в одноканальном режиме. Фоновое гамма излучение измерено Si детектором без слоя Gd. Измерения проводились последова-

тельно в равной геометрии. При этом гамма излучение источника нейтронов $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha,n)$ отсекалось защитным слоем свинца и железа. Таким образом проводилась регистрация потока тепловых нейтронов в отсутствии гамма фона.

Цель настоящей работы – создание и испытание двухдетекторной детектирующей системы на основе двух неохлаждаемых кремниевых детекторов и металлического гадолиния для регистрации тепловых нейтронов с возможностью отстройки от фонового гамма-излучения. Измерения проводились одновременно двумя детекторами. В экспериментах гамма излучение не подавлялось.

Экспериментальная методика

Природный гадолиний содержит два важных изотопа: ^{155}Gd – 14,8% (сечение 17 000 барн), ^{157}Gd – 15,7% (поперечное сечение 300 000 барн). Реакции захвата нейтронов с максимальным поперечным сечением:



В работе регистрируются линии ХРИ Gd с энергиями $K_\alpha=42.99$ кэВ и $K_\beta=48.69$ кэВ и конверсионные электроны в диапазоне энергий conversion 30...200 кэВ.

Для получения тепловых нейтронов использовался источник быстрых нейтронов $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha,n)$ с замедлителем из парафина. Нейтронные источники излучают как нейтроны, так и гамма кванты в широком диапазоне энергий. Интенсивность гамма излучения обычно сравнима или заметно выше нейтронного потока.

Применена гадолиниевая пластина толщиной 0.4 мм, расположенная вплотную к Si детектору (рис. 1). Конструкция модуля для регистрации тепловых нейтронов подробно описана в [6].

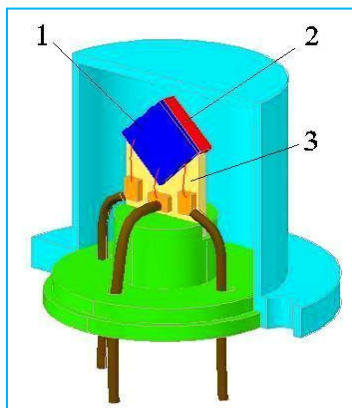


Рис. 1. Общий вид герметизированного модуля: 1 – Si детектор, 2 – Gd конвертор, 3 – ситаловая подложка

Fig. 1. General view of the sealed module: 1 – Si detector, 2 – Gd converter, 3 – sital substrate

Для калибровки спектрометрических систем и создания смешанных электронных и гамма полей излучения применены радиоактивные источники ^{241}Am , ^{57}Co , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{137}Cs .

На рис. 2 представлена схема эксперимента, использованная в настоящей работе.

Двухдетекторная система, реализующая разделение гамма-нейтронного потока. В двухдетекторном модуле размещены два неохлаждаемых ПКД размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с толщиной 300 мкм. На одном из размещенных детекторов установлен Gd конвертор. Применена обратная геометрия, когда слой Gd расположен позади Si детектора. D – толщина парафина между источником быстрых нейтронов и детектором. Толщина парафина (D, см) может изменяться от 0 до 10 см с шагом 2 см. Пластина из Al толщиной 0.5 мм является частью конструкции герметизированного детектора. В экспериментах не использовались защитные фольги из Pb, Fe для отсекаемого фонового гамма излучения.

В предположении равенства гамма-откликов обеих детекторов, из спектрального распределения первого детектора с Gd вычитается распределение, полученное детектором без Gd, соответствующий фоновому гамма отклику. Таким образом, выделялся полезный сигнал выхода реакции захвата Gd(n, γ)Gd.

На рис. 3 изображен двухдетекторный модуль для регистрации тепловых нейтронов.

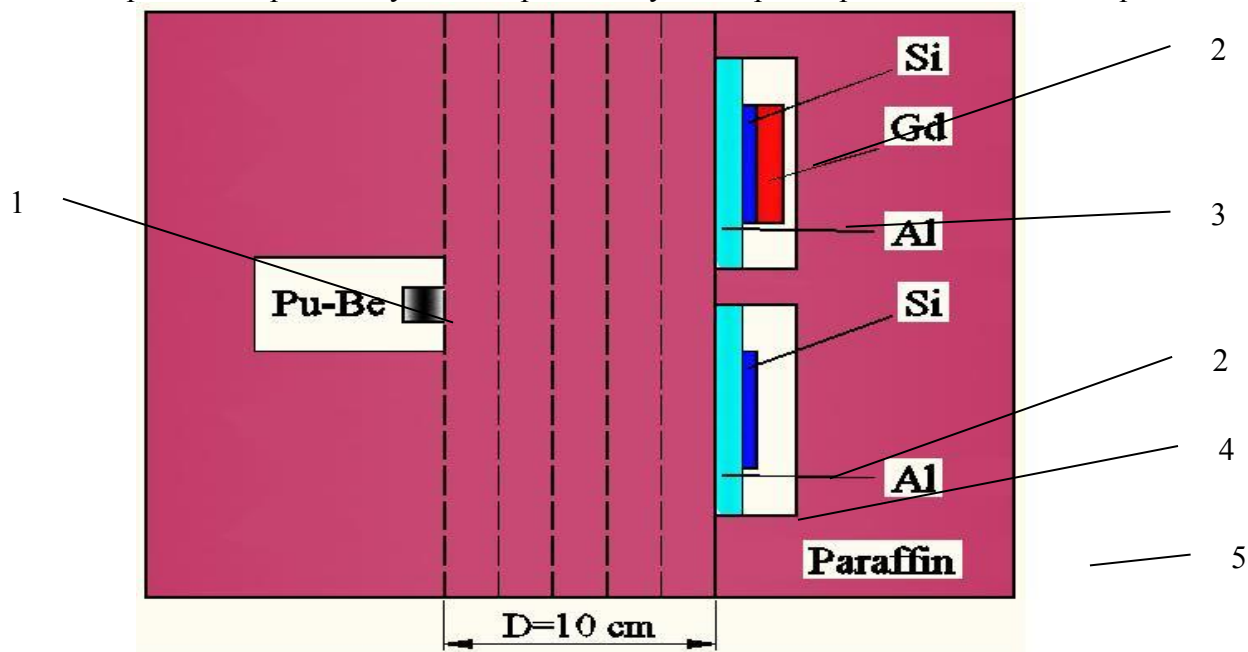


Рис. 2. Схема эксперимента в геометрии, когда Gd расположен позади Si детектора:
1 – $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$ источник нейтронов, 2 – Si детектор, 3 – Gd конвертер, 4 – Al корпус,
5 – парафиновый замедлитель

Fig. 2. Schematic of the experiment in geometry, when Gd is located behind the Si detector:
1 – $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$ neutron source, 2 – Si detector, 3 – Gd converter, 4 – Al casing, 5 – paraffin moderator



Рис. 3. Двухдетекторный модуль для регистрации тепловых нейтронов: 1 – аналогово-цифровые преобразователи, 2 – кремниевые детекторы Si-Gd и Si, 3 – спектрометрическая электроника
Fig. 3. Two-detector module for recording thermal neutrons: 1 – analog-to-digital converters, 2 – silicon detectors Si-Gd and Si, 3 – spectrometric electronics

В модуле применены два неохлаждаемых кремниевых детектора с близкими характеристиками в отдельных корпусах с оптимизацией расположения детекторов и спектрометрической электроники. Конструкции детекторов подобны друг другу, но в отличие от второго детектора, первый детектор имеет Gd конвертор. В центре два спектрометрических усилителя на основе двух герметизированных модулей: Si-Gd и Si. Затем сверху помещаются бруски парафина. Предусилитель спектрометрического тракта находится внутри парафина. Источник нейтронов помещается на вертикальной оси посередине между двумя детектирующими модулями. Это обеспечивает одинаковое гамма и нейтронное излучения для двух детекторов.

Разработана программа одновременного считывания сигналов с двух детекторов. Окно программы набора спектра изображено на Рис. 4.

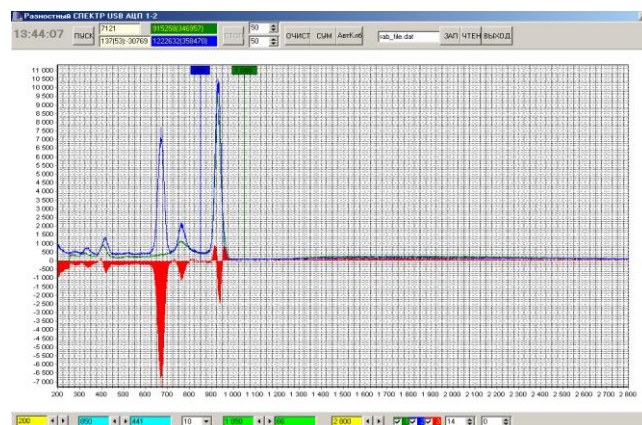
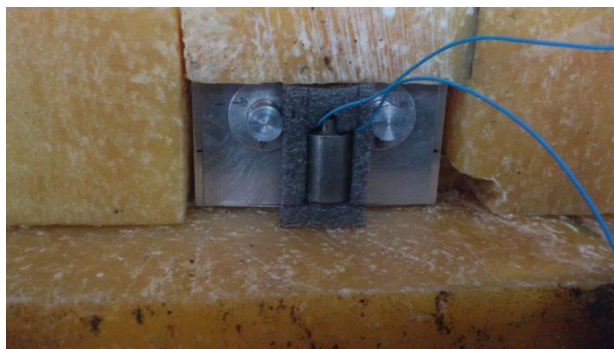


Рис. 4. Окно программы набора спектра от источника ^{241}Am . Синяя линия – детектор с Gd, зеленая линия – детектор без Gd, красная линия – разность спектров

Fig. 4. The window of the program for dialing the spectrum from the source ^{241}Am . The blue line is the detector with Gd, the green line is the detector without Gd, the red line is the spectrum difference

Происходит одновременный набор спектров (синяя линия – детектор с Gd , зеленая линия – детектор без Gd) двумя детекторами. Показан также «вычет» двух спектров – разность спектров – красная линия. На рисунке регистрируются линии излучения от источника ^{241}Am .

На Рис. 5 показаны варианты расположения двухдетекторной детектирующей системы в парафиновом модераторе. Рис. 5 а – источник нейтронов вплотную к детекторам. Рис. 5 б – процесс обкладывывания детектора парафином.



а)



б)

Рис. 5. Расположения двухдетекторной детектирующей системы в парафиновом модераторе

Fig. 5. The locations of two-detector detection system in paraffin moderator

Результаты и их обсуждение

Некоторые трудности при проведении измерений и вычетов двух спектров, полученных двумя спектрометрическими системами на основе Si планарных детекторов с Gd конвертором и без конвертора, показаны на рис. 6.

На рис. 6 а представлены расчетные пики излучения с энергиями в максимуме 59 и 60 кэВ. Ширины на полувысоте FWHM составляют 1.5 кэВ. На рис. 6 б представлены расчетные пики излучения с энергиями в максимуме 60 кэВ. Ширины на полувысоте FWHM составляют 1.7 и 1.5 кэВ. Показаны также результаты вычитания спектров.

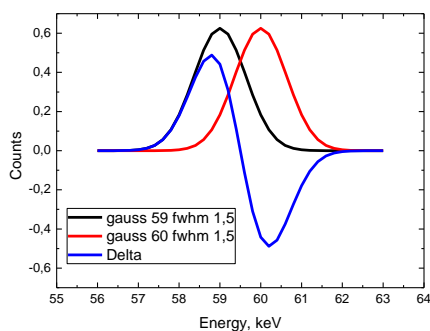


Рис. 6 а. Расчетные пики излучения с энергиями в максимуме 59 и 60 кэВ. Ширины на полувысоте FWHM составляют 1,5 кэВ. Delta – результат вычитания двух спектров

Fig. 6 a. Calculated radiation peaks with energies at a maximum of 59 and 60 keV. The widths at half the height of the FWHM are 1.5 keV. Delta is the result of subtraction of two spectra

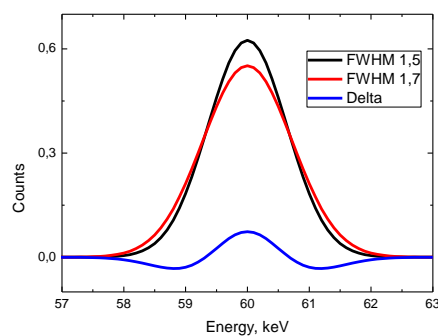


Рис. 6 б. Расчетные пики излучения с энергиями в максимуме 60 кэВ. Ширины на полувысоте FWHM составляют 1,7 и 1,5 кэВ. Delta – результат вычитания спектров

Fig. 6 b. Calculated emission peaks with energies at a maximum of 60 keV. The widths at half-height FWHM are 1.7 and 1.5 keV. Delta is the result of subtracting spectra

Как можно видеть, даже небольшое различие в положении пиков излучения, связанных в эксперименте с различным усилением спектрометрического тракта, или ширины пиков излучения, связанных с разрешением детектора, приведет к характерному искажению разности (вычета) спектров. То есть вместо ожидаемого нулевого уровня сигнала, можно получить выбросы в спектре вычета.

Далее переходим к регистрации тепловых нейтронов по выходу реакции $Gd(n, \gamma e)$ Gd двумя детекторами, а также к идентификации и выделению конверсионных электронов. В экспериментах не использовались защитные фольги для отсека гамма излучения.

Предварительно измерены отклики двух детекторов на гамма излучение $^{239}\text{Pu-Be}$ (α, n) источника быстрых нейтронов. Парафиновый замедлитель был полностью удален со всех сторон. Отклик детектора формировался быстрыми нейтронами и гамма излучением. На Рис. 7 показаны экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с гадолиниевым конвертором и без конвертора. Спектр Delta – разность спектров излучения.

Как можно видеть, разрешение детекторов в двух случаях различно. Поэтому при вычитании спектров возникает характерное искажение спектра в области энергии 59.54 кэВ. Такое искажение показано на Рис. 6 б. Наблюдаются отчетливые пики ХРИ от Gd, линия 59.54 кэВ и небольшой фон от источника нейтронов. Никаких выраженных структур после 900 канала (выше 60 кэВ) в спектрах и в спектре – разности не наблюдается. В дальнейших экспериментах использовались детекторы с одинаковым энергетическим разрешением FWHM ~ 1.55 кэВ.

Расчетные спектры конверсионных электронов в реакции захвата нейтронов в природном Gd представлены на Рис. 8 [4,10]. Ожидается регистрация электронов конверсии в

виде спектра с двумя выпуклостями с энергиями 70 и 80 кэВ. Стрелками показаны положения линий ХРИ Gd и линии гамма излучения с энергией 59.54 кэВ. На Рис. 9 показаны экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с Gd конвертором и без. Использован слой парафина D = 2 см.

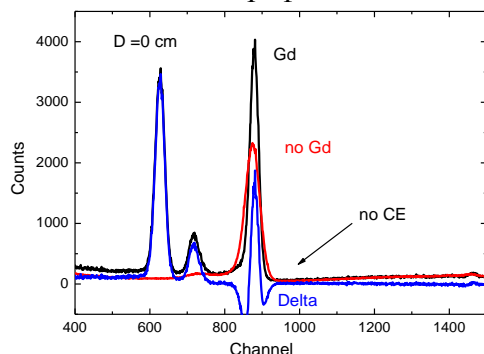


Рис. 7. Экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с гадолиниевым конвертором и без конвертора. Замедлитель и защита удалены. Delta – разность спектров излучения

Fig. 7. Experimental spectra measured by two detection modules Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ with gadolinium converter and without converter. Moderator and protection removed. Delta is the difference between the emission spectra

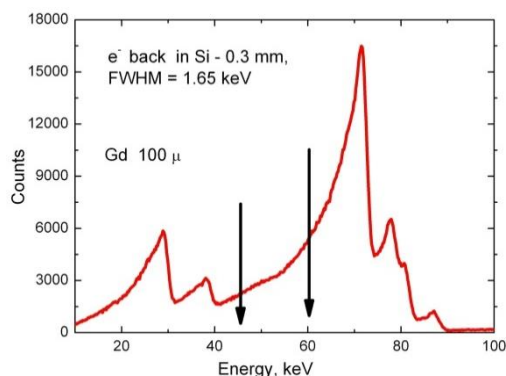


Рис. 8. Расчетные спектры конверсионных электронов в реакции захвата нейтронов в природном Gd

Fig. 8. Calculated spectra of conversion electrons in the neutron capture reaction in natural Gd

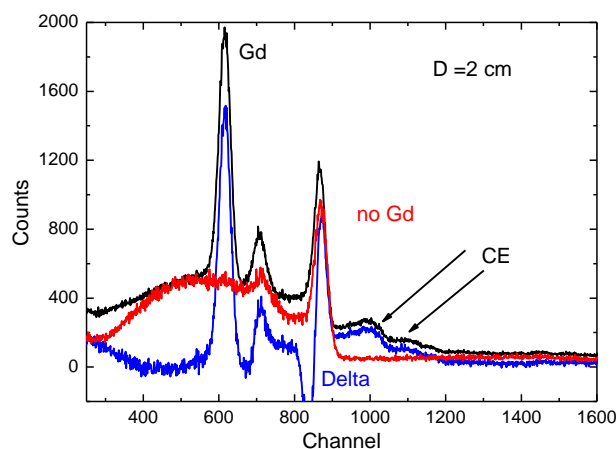


Рис. 9. Экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с гадолиниевым конвертором и без. Delta – разность спектров излучения. D = 2 см

Fig. 9. Experimental spectra measured by two detection modules Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ with gadolinium converter and without. Delta is the difference between the emission spectra. D = 2 cm

Обращает на себя внимание отчетливая двухгорбая структура в виде широкого распределения в области >60 кэВ. Это спектр конверсионных электронов (СЕ), соответствующая группам электронов с энергиями ~ 70 и 80 кэВ. Тонкая структура спектра конверсионных электронов не видна, что обусловлено разрешением кремниевого детектора FWHM ~ 1.55 кэВ, а также страгглингом энергий электронов при их прохождении через слой гадолиния и защитного пассивирующего слоя Si детектора.

Таким образом, спектры содержат распределение конверсионных электронов (СЕ), линий ХРИ Gd при наличии конвертора из Gd, остаточную линию гамма излучения с энергией 59.54 кэВ из $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$ источника нейтронов. Удалось экспериментально зарегистрировать конверсионные электроны из реакции захвата нейтронов $\text{Gd}(n, \gamma + e^-)\text{Gd}$.

Кроме того, в спектре имеется характерная огибающая линия-выпуклость в диапазоне $300\text{--}800$ канала. Здесь регистрируются гамма кванты обратного и многократного рассеяния от линии 59.54 кэВ. Так образуется дополнительный выгиб, устранить который можно только вычитанием спектров.

Отметим, что даже в случае неполной компенсации пика 59.54 кэВ, группа конверсионных электронов выделяется вполне отчетливо. Можно сопоставить количество конверсионных электронов с расчетными данными и определить усредненное значение потока тепловых нейтронов.

После проведения коррекции усиления спектрометрического тракта по положению максимумов пиков излучения от радиоактивных источников были проведены аналогичные измерения для $D = 4$ см. Результат экспериментального измерения для $D = 4$ см показан на Рис. 10. Представлены два экспериментальных спектра, измеренные двумя детектирующими модулями Si, 5×5 мм² с гадолиниевым конвертором и без конвертора и их разница (вычет).

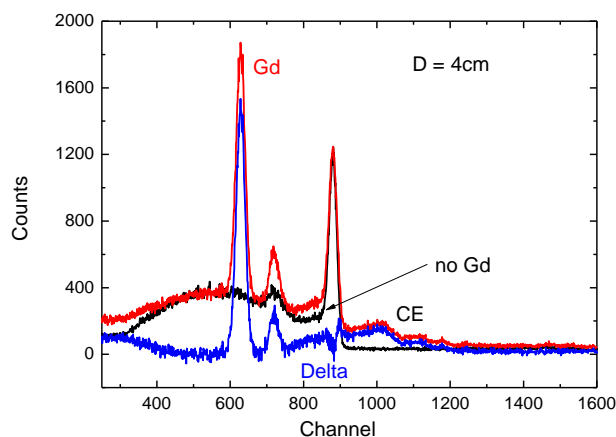


Рис. 10. Экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, 5×5 мм² с гадолиниевым конвертором и без. Delta – разница спектров излучения. $D = 4$ см

Fig. 10. Experimental spectra measured by two detection modules Si, 5×5 мм² with gadolinium converter and without. Delta is the difference between the emission spectra. $D = 4$ cm

Как можно видеть, линии ХРИ гадолиния и конверсионные электроны практически очистились от фонового гамма излучения. Осталось незначительное искажение спектра, связанное с некорректным вычетом линии 59.54 кэВ. Группа конверсионных электронов выделяется вполне отчетливо. Здесь возможно провести аппроксимацию спектра конверсионных электронов в диапазоне каналов $750\text{--}1000$.

Проведены аналогичные измерения для $D=10$ см. Результаты экспериментального измерения показаны на Рис. 11. Представлены два экспериментальных спектра, измеренные двумя детектирующими модулями Si, 5×5 мм² с гадолиниевым конвертором и без конвертора и их разница (вычет).

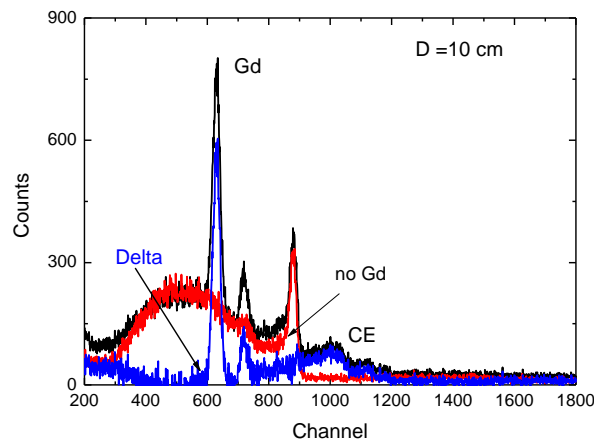


Рис. 11. Экспериментальные спектры, измеренные двумя детектирующими модулями Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с гадолиниевым конвертором и без. Delta – разность спектров излучения. $D = 10 \text{ см}$
 Fig. 11. Experimental spectra measured by two detection modules Si, $5 \times 5 \text{ мм}^2$ with gadolinium converter and without. Delta is the difference between the emission spectra. $D = 10 \text{ см}$

В этом эксперименте линии ХРИ гадолиния и конверсионные электроны практически полностью очистились от фонового гамма излучения. Искажения спектра-разницы минимальны. Конверсионные электроны выделяются отчетливо.

Выводы

Разработан и испытан малогабаритный модуль детектирования тепловых нейтронов на основе двух Si детекторов и металлического Gd конвертора. Использовались детекторы с площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$ и толщиной 0.3 мм.

Были измерены экспериментальные спектры для реакции $\text{Gd}(n, \gamma)\text{Gd}$. Спектры состояли из линий Gd CXR с энергией 42.99 и 48.69 кэВ и конверсионных электронов в диапазоне энергий 30...200 кэВ с максимумом при энергии $\sim 70 \text{ кэВ}$. Фоновое гамма излучение измерено Si-детектором без слоя Gd. Защита от излучений не применялась. Измерения проводились одновременно, экспериментальные спектры вычитались.

Для получения тепловых нейтронов использовался $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$ источник быстрых нейтронов с парафиновым замедлителем.

Можно сделать вывод о возможности успешного применения системы из двух детекторов для регистрации тепловых нейтронов по выходу конверсионных электронов реакции $\text{Gd}(n, \gamma)\text{Gd}$ с возможностью отстройки от фонового излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-12-10019).

Список литературы

References

1. Foglio-Para A. , Gottardi N.A. , M. Mandelli Bettoni. 1968. Thermal neutrons Gd-detector. Nucl. Instr. and Meth. Vol. 65, Iss.1: 110–112.
2. Bruckner G. , Rauch H. 1996. A position sensitive Gd detector for thermal neutrons. J. Nucl. Research. 4: 141-147.
3. Bruckner G. , Czermak A. , Rauch H. , Weilhammer P. 1999. Position sensitive detection of thermal neutrons with solid state detectors (Gd Si planar detectors). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 424:183-189.
4. Deiev O.S. 2013. GEANT4 simulation of neutron transport and scattering in media. Problems of atomic science and technology, № 3(85), Series: Nuclear Physic Investigations (60): 236-241.



5. Dubina V.N. , Kiprich S.K. , Maslov N.I., Ovchinnik V.D. 2016. Thermal Neutrons Detection Module Capable of Electron and Gamma Separation and Background Suppression. Problems of atomic science and technology, N5(105). Series:Nuclear Physics Investigations (67): 88-93.

6. Vasiliev G.P. , Deiev O.S. , Kiprich S.K. , Kapliy O.A. , Maslov N.I. , Ovchinnik V.D. , Potin S.M. , Shulika M.Yu. , Yalovenko V.I. 2016. Module for thermal neutrons registration based on uncooled silicon detectors and metal gadolinium converter. Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”, №3(103): 99-104.

7. Vasilyev G.P. , Voloshin V.K. , Kiprich S.K. et al. 2010. Encapsulated modules of silicon detectors of ionizing radiation. Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physics Investigations (54): 200-204.

8. Bochek G.L. , Deiev O.S. , Maslov N.I. , Voloshyn V.K. 2011. X-ray lines relative intensity depending on detector efficiency, foils and cases thickness for primary and scattered spectra// Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physic Investigations (55): 42-49.

9. Vasiliev G.P. , Voloshyn V.K. , Deiev O.S. , Kiprich S.K. , Maslov N.I. , Naumov S.V. , Ovchinnik V.D. , Potin S.M. , Shulika M.Y. and Yalovenko V.I. 2014. Measurement of Radiation Energy by Spectrometric Systems Based on Uncooled Silicon Detectors. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, № 4: 94-100.

10.Bochek G.L. , Deiev O.S. , Kiprich S.K. , Maslov N.I. , Shulika M.Y. , Vasiliev G.P. , Yalovenko V.I. 2016. Registration of the thermal neutrons using uncooled Si planar detectors. Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”, №4(104) : 107-112.