

НАПІВЕМПІРИЧНЕ ОПИСАННЯ АБСОЛЮТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ Ge(Li)- ТА HPGe- ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ ФОТОПОДІЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

О.І. Лендел, О.О. Парлаг, В.Т. Маслюк

Інститут електронної фізики НАН України
88017, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна

Запропоновано напівемпіричне співвідношення описання абсолютної ефективності напівпровідникових Ge(Li)- та HPGe- детекторів при різних геометричних умовах проведення вимірів для застосування у фотоподільних експериментах.

Вступ

При проведенні фотоядерних експериментів, а саме отриманні експериментальної інформації про продукти фотоядерних реакцій та фотоподілу актинідних ядер широко застосовується метод напівпровідникової гамма-спектрометрії [1-3].

Незважаючи на певні недоліки, пов'язані з аналізом короткоживучих нуклідів, обмеженістю придатних для аналізу гамма-ліній, необхідністю обробки гамма-спектрів із великим числом компонент, метод гамма-спектрометрії є перспективним завдяки сучасним можливостям автоматизації накопичення та обробки експериментальної інформації, відсутності проміжних операцій і незалежності місця аналізу від місця проведення експерименту.

В [4-6] проведено аналіз точності даного методу досліджень для визначення виходів продуктів поділу як при абсолютних, так і при відносних вимірюваннях. Точність у першу чергу залежить від калібрування напівпровідникового детектора по абсолютній ефективності та врахування геометричних поправок при проведенні вимірів.

У даній роботі запропоновано напівемпіричне співвідношення описання абсолютної ефективності напівпровідникових Ge(Li)- та HPGe- детекторів при різних геометричних умовах проведення калібрування для застосування у фотоядерних (подільних) експериментах.

Напівемпіричне описання залежності абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів

В останні роки для визначення ефективності Ge(Li)- та HPGe- детекторів були запропоновані чисельні методи розрахунку, що враховують як фізичні процеси, що відбуваються при поглинанні і розсіюванні фотонів, так і певну геометрію експерименту [7].

Криву ефективності можна умовно розділити на дві характерні ділянки (див. рис. 1), кожна з яких вимагає окремої апроксимуючої функції. Враховуючи обмежену кількість експериментальних точок, слід вибрати відносно невелике число параметрів, достатнє для якісного описання кривої (у межах одного стандартного відхилення).

Для більшості випадків гамма-спектрометрії інтервал енергій фотонів знаходиться у межах від 60 до 3000 кеВ. У заданому інтервалі вимірюваних точок ефективності потрібно мати певну інтерполяційну формулу для обчислення ефективності при інших енергіях. Для цієї задачі можна використати такі дві функції [8]:

$$\ln \varepsilon = \sum a_i \ln (E/E_0)^i \text{ для } E \geq 200 \text{ кеВ} \quad (1)$$

та

$$\ln \varepsilon = \sum a_i / E^i \text{ для } E \leq 200 \text{ кеВ} \quad (2)$$

де ε – ефективність детектора, $E_0 = 1$ кеВ.

Обмежуючись можливим найменшим числом параметрів, виберемо форму

ефективності як

$$\ln \varepsilon = a_1 \ln E/E_0 + a_2 (\ln E/E_0)^2 + a_3 (\ln E/E_0)^3 - a_4 / E^\gamma \quad (3)$$

Запропоноване напівемпіричне співвідношення описання абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів реалізоване для напівпровідникового Ge(Li)- та HPGe-детекторів, характеристики яких надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики напівпровідникових детекторів

Тип детектору	Ge(Li)	HPGe
Модель	ДГДК-100В	Gem 40195
Серійний №	1627	27 P1892A
Виробник	Латв. РСР	ORTEC, USA
Об'єм кристалу, см ³	100	150
Радіус кристалу, мм	22,1	31,4
Віддаль від кришки детектору до поверхні кристалу, мм	7,0	3,0
Товщина кришки детектору, мм	1,0	1,0

Результати описання залежності абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів представлено на рис. 1 (А – Ge(Li)-, В – HPGe- детектори). Крива – результат описання формулою (3), точки – експериментальні значення стандартних калібрувальних джерел ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹³⁹Ce, ¹⁵²Eu, ²⁴¹Am трикутники – гамма-випромінювання радіоактивних нуклідів у ланцюжках розпаду уламків ⁸⁷Kr, ⁹¹Sr, ⁹²Sr, ⁹⁷Zr, ⁹⁹Mo, ¹⁰³Ru, ¹³⁹Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴²La, ¹⁴³Ce, ¹⁴⁷Nd поділу з реакції ²³⁵U(n_{th},f) [5,6] та ²⁵²Cf(sf) [4]. Значення залежності абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів, які визначалися за допомогою набору стандартних точкових джерел та з використанням гамма-випромінювання радіоактивних нуклідів у ланцюжках розпаду уламків поділу узгоджуються між собою у межах статистичної похибки вимірів. Статистична похибка визначення абсолютної ефективності для окремих енергій гамма-квантів не перевищувала ~5 – 8 %.

Найкращі розрахунки для описання значень калібрувальних точок абсолютної

ефективності в зазначеному інтервалі енергій (див. рис. 1) для Ge(Li)- та HPGe-детекторів одержано за допомогою параметрів для: a₁ = 2,57; a₂ = - 0,575; a₃ = 0,0307; a₄ = 3,72 10⁸; γ = 4,69; E₀ = 1 кеВ та a₁ = 2,48; a₂ = - 0,497; a₃ = 0,0245; a₄ = 3,46 10⁵; γ = 2,91; E₀ = 1 кеВ відповідно.

Якість описання у цих випадках з врахуванням зазначеної статистичної похибки для Ge(Li)- та HPGe- детекторів χ² на степінь свободи 2,1 та 0,82 відповідно.

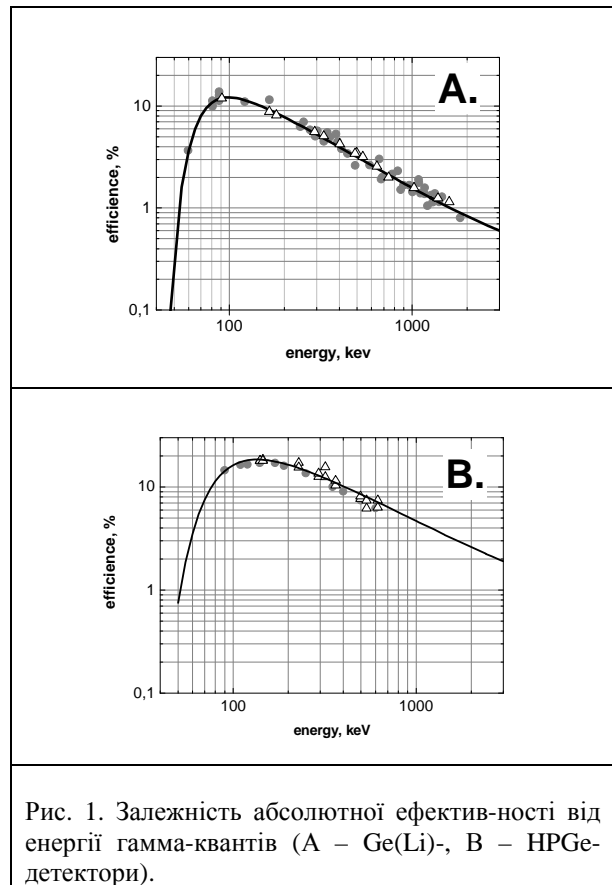


Рис. 1. Залежність абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів (А – Ge(Li)-, В – HPGe-детектори).

Розрахунок поправочних коефіцієнтів для абсолютної ефективності із заданими геометричними умовами калібрування

Вище одержаний аналітичний вираз (3) абсолютної ефективності для широкого діапазону енергій гамма-квантів справедливий для точкових джерел.

При проведенні реальних вимірів необхідно враховувати геометричні розміри випромінюючого джерела гамма-квантів, площі ефективної поверхні детектору, віддаль від джерела до поверхні

детектора. Тобто уводити поправку на ефективний тілесний кут захоплення гамма-випромінювання поверхнею детектора від джерела гамма-квантів [9, 10].

Виходячи із геометричних умов виміру виникає необхідність розрахунку тієї частини випромінювання $\bar{\rho}$, яка попадає з поверхні джерела певної геометричної форми на детектор, тобто розрахувати ефективний тілесний кут захоплення γ -випромінювання поверхнею детектору φ .

Проведено розрахунки для реальних геометричних розмірів Ge(Li)- та HPGe-детекторів (див. таблиця 1) та плоских круглих джерел довільного радіусу для різних віддалей джерело – детектор. Розрахунки проводилися по формулі [10, 11]:

$$\frac{N}{E_1} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \bar{\rho} d\bar{\rho} \int_0^\pi \left\{ 1 - \cos \left[\arctg \frac{R_1}{L} (\bar{\rho} \cos \varphi + \sqrt{\frac{R_2^2}{R_1^2} - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi}) \right] \right\} d\varphi \quad (4)$$

де E_1 – кількість гамма-квантів випущених з випромінюючої поверхні джерела, N – кількість гамма-квантів, які досягли поверхні детектора, R_1 – радіус випромінюючої поверхні джерела, R_2 – радіус ефективної поверхні кристалу детектору, L віддалі від джерела гамма-квантів до поверхні кристалу детектору.

Ця формула дає значення частини гамма-квантів, які падають з джерела (диска-випромінювача) на робочу поверхню детектора. Оскільки інтеграл правої частини останнього рівняння елементарно не інтегрується, обрахуємо його наближено. Значення

$$\cos \left[\arctg \frac{R_1}{L} \left(\bar{\rho} \cos \varphi + \sqrt{\frac{R_2^2}{R_1^2} - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi} \right) \right] d\varphi \quad (5)$$

визначимо для величини φ з інтервалом через $10^\circ = \frac{\pi}{18}$, значення $\bar{\rho}$ – з інтервалом 0,1. Розрахунки проводилися методом Сімпсона з точністю до 5 десяткових значень.

Залежність значень геометричних поправок для Ge(Li)- (A) та HPGe- (B) детекторів від радіуса випромінюючої поверхні джерела гамма-квантів та його віддалі до ефективної поверхні детектора представлено на рис. 2.

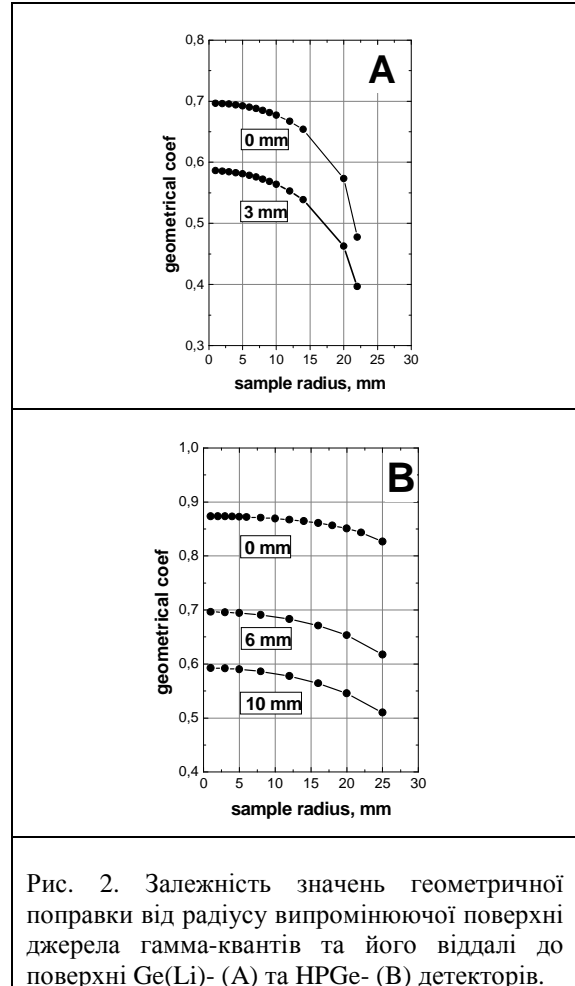


Рис. 2. Залежність значень геометричної поправки від радіуса випромінюючої поверхні джерела гамма-квантів та його віддалі до поверхні Ge(Li)- (A) та HPGe- (B) детекторів.

Висновки

У даній роботі запропоновано напівемпіричне співвідношення описання абсолютної ефективності напівпровідникових Ge(Li)- та HPGe- детекторів при різних геометричних умовах проведення калібрування. Це дозволяє відмовитися від довготривалого та трудомісткого процесу виготовлення еталонних зразків для калібрування. За допомогою цих співвідношень можна обчислити ефективність гамма-спектрометрів при проведенні вимірів з джерелами заданої форми і розмірів для великої кількості нуклідів, вихід яких визначається у фотоядерних (подільних) експериментах.

Література

1. Парлаг О.О., Маслюк В.Т., Пуга П.П., Головей В.М. Каталог гамма-спектрів продуктів активації хімічних елементів гальмівним випромінюванням мікротрона // К.: Наукова думка, 2008. – 184 с.
2. Парлаг О.О., Маслюк В.Т., Лендел О.І., Пилипченко В.А. Особливості виміру кумулятивних виходів уламків фотоподілу актинідних ядер // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – 2002, № 11. – С. 171–176.
3. Nair C., Junghans A.R., Erhard M. et al. Absolute Efficiency Calibration of HPGe Detectors for Photoactivation Experiments // Annual Reports - Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, FZD. 2005. - Режим доступу до журн.: <http://www.fzd.de/FWK/jb05/PDF/s41.pdf>
4. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И. и др. О возможности и точности измерений характеристик продуктов деления ядер методом полупроводниковой гамма-спектрометрии // Вопросы точности ядерной спектроскопии. - Вильнюс, 1990. - С. 143-148.
5. Парлаг О.О. Використання гамма-випромінювання уламків поділу ^{235}U для калібровки Ge-детекторів // Тези доповідей міжнародної конференції „Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики”. 29 травня – 3 червня 2006 р. Київ, Україна. – С. 183–184.
6. Парлаг О.О. Використання гамма-випромінювання уламків поділу ^{235}U для калібровки Ge- та Ge(Li)-детекторів // Матеріали міжнародної конференції „Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики”. 29 травня – 3 червня 2006 р. Київ, Україна. Київ, 2007. Ч. 1. – С. 829–832.
7. Debertin K., Helmer R. Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors. (Third impression) // Elsevier Science B.V. Amsterdam, The Netherlands, 2001. – P. 213–225.
8. Lendel A., Parlag O. Semiempirical description of Ge(Li)- or Ge- detectors efficiency for wide energy region // Abstracts 58 International Conference on Nuclear spectroscopy and structure of atomic nucleus. “Nucleus 2008”. 23 – 27 june, 2008. Moscow. – P. 313.
9. Moens L., Donder j. De, Lin Xi-lei et al. Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries // Nuclear Instruments and Methods, 1981. – V. 187. – P. 451–472.
10. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement // Third edition. - NY: John Wiley & Sons, Inc., 2000. - P. 116-119.
11. Шевченко И.Н., Даниленко А.И. Расчет количества частиц, попадающих в окно счетной трубки от плоского излучателя / И.Н. Шевченко, А.И. Даниленко – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с.

SEMIEMPIRICAL DESCRIPTION OF Ge(Li)- AND HPGe- DETECTORS EFFICIENCY FOR PHOTOFISSION EXPERIMENTS

O.I. Lengyel, O.O. Parlag, V.T. Maslyuk

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod

The semiempirical description of Ge(Li)- and HPGe- detectors efficiency for different counting geometry for photofission experiments was proposed.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АБСОЛЮТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ Ge(Li)- И HPGe- ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФОТОДЕЛЕНИЮ

А.И. Лендьел, О.А. Парлаг, В.Т. Маслюк

Предложено полуэмпирическое соотношение для описания абсолютной эффективности полупроводниковых Ge(Li)- и HPGe- детекторов при разных геометрических условиях проведения измерений в экспериментах по фотоделению.