

XÂY DỰNG HÀM HIỆU SUẤT TUYỆT ĐỐI PHỤ THUỘC VÀO NĂNG LƯỢNG TỪ 1 MeV ÷ 8,5 MeV CỦA DETECTOR HPGe

NGUYỄN AN SƠN*, ĐẶNG LÀNH*,
HỒ HỮU THẮNG**, TRẦN VĂN NGUYỄN***

TÓM TẮT

Do hạn chế về dải năng lượng của các nguồn phóng xạ chuẩn (thông thường < 3 MeV), việc thiết lập các hàm hiệu suất tuyệt đối của các hệ đo khi dùng các nguồn phóng xạ chuẩn sẽ làm hạn chế đến các ứng dụng thực tế cũng như các nghiên cứu bức xạ ở vùng năng lượng lớn tương ứng với năng lượng liên kết của nucleon trong hạt nhân (~ 8 MeV). Bài báo này trình bày kết quả xây dựng hàm hiệu suất tuyệt đối của hệ phổ kế gamma sử dụng detector HPGe trong dải năng lượng từ 1 MeV đến 8,5 MeV bằng phương pháp kích hoạt Cl^{35} và đo bức xạ gamma tức thời bằng phản ứng $^{35}Cl(n, \gamma)Cl^{36}$.

Từ khóa: hiệu suất tuyệt đối, hiệu suất tương đối, hạt nhân hợp phân, phản ứng $^{35}Cl(n, \gamma)Cl^{36}$.

ABSTRACT

Determining the absolute efficiency function depending on energy in the range 1 MeV ÷ 8,5 MeV of HPGe detector

Because of the restriction of energy ranges of usual standards of gamma source, normally smaller than 3 MeV, the determination of absolute efficiency functions of nuclear measurement system by using gamma sources will limit some applications and researches on high energy corresponding to nucleon binding energy (~ 8 MeV). This paper presents the procedure and result of the determination of absolute efficiency function of a gamma spectrometer using HPGe detector in energy range from 1 MeV to 8,5 MeV by activating ^{35}Cl and prompt gamma measurement of $^{35}Cl(n, \gamma)Cl^{36}$ reaction.

Keywords: Absolute efficiency; Relative efficiency; Compound nucleus; $^{35}Cl(n, \gamma)Cl^{36}$ reaction.

1. Tổng quan

Trong thực nghiệm vật lý hạt nhân cũng như các ứng dụng đo đạc thực nghiệm phân rã phóng xạ, việc xác định hiệu suất tuyệt đối theo năng lượng của hệ phổ kế là thiết thực và là điều kiện cần để khẳng định tính chính xác của kết quả đo đạc về mặt định lượng của hệ phổ kế. Tuy nhiên, việc xác định hàm hiệu suất trên dải năng lượng rộng gặp rất nhiều khó khăn do hạn chế về năng lượng phát của các nguồn chuẩn.

* TS, Trường Đại học Đà Lạt

** ThS, Viện Nghiên cứu Hạt nhân

*** ThS, Trường Cao đẳng nghề Đà Lạt

Ở các công trình đã công bố, hàm hiệu suất tuyệt đối chỉ giới hạn trong vùng năng lượng < 3 MeV, bằng việc sử dụng năng lượng của các đồng vị phóng xạ [4, 5]. Thực tế, các nguồn đồng vị phóng xạ có năng lượng từ 1,5 MeV hay được sử dụng, vì những nguồn đồng vị này có thời gian bán rã lớn, do vậy hiệu quả sử dụng sẽ cao, đây là lí do chính mà các phòng thí nghiệm chọn lựa để trang bị các nguồn gamma.

Để xây dựng hàm hiệu suất trên dải năng lượng lớn hơn, việc ngoại suy hoặc sử dụng mô phỏng bằng phần mềm MCNP được tiến hành [3]. Điều này dẫn đến hạn chế cũng như mức độ thiếu tin cậy khi áp dụng đo với các năng lượng.

Và thực tế, cho đến nay ở Việt Nam vẫn chưa có những công bố về số liệu thực nghiệm của hàm hiệu suất trên dải năng lượng lớn bằng đo đạc thực nghiệm. Các công bố về hàm hiệu suất tuyệt đối chủ yếu được thực hiện cũng tương tự như trên thế giới, tức là các công bố hàm hiệu suất ở năng lượng thấp [6]. Công trình của nhóm tác giả [2] đã xây dựng hàm tương đối cho hệ trùng phùng từ 500 keV đến 8000 keV. Tuy nhiên, nghiên cứu này cũng không xác định hàm hiệu suất tuyệt đối trên dải năng lượng này.

Trong nghiên cứu này, hệ đo thực nghiệm là hệ phổ kế gamma 16 k, sử dụng detector loại Ge siêu tinh khiết. Phương pháp tạo nguồn gamma trên dải năng lượng lớn bằng cách kích hoạt bia mẫu ^{35}Cl trên kênh số 3 của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, đo gamma tức thời dựa vào phản ứng $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)\text{Cl}^{36}$. Kết quả đã xây dựng được đường cong hiệu suất tương đối trong dải năng lượng 1 MeV đến 8,5 MeV, và xác định được hàm hiệu suất tuyệt đối ở dải năng lượng nêu trên.

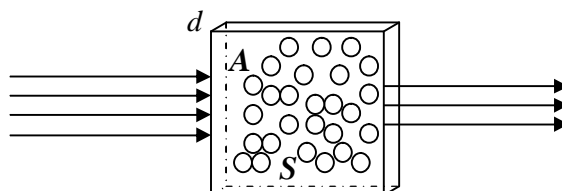
2. Cơ sở lý thuyết

Hàm hiệu suất theo năng lượng trên dải rộng thường được khuyến cáo là một trong những dạng logarit hoặc hàm mũ [9]. Để có dải năng lượng lớn khi xây dựng hiệu suất của hệ, thực nghiệm sử dụng với phản ứng bắt neutron và trở thành hạt nhân hợp phần, sau đó phân rã gamma tức thời. Trong cơ chế phản ứng hạt nhân hợp phần, các hạt tham gia tương tác a và A tạo nên hạt nhân hợp phần C, sau đó hạt C phân rã thành các hạt thứ cấp b và B theo phương trình phân rã sau:



Thời gian đặc trưng cho phân rã của phản ứng hạt nhân hợp phần vào cỡ 10^{-14} s.

Giả sử có dòng hạt a đi vào với cường độ N_a (hạt/s) tương tác với hạt nhân bia A (hình 1). Bia A có nồng độ n (hạt/cm³). Giả thiết bia đủ mỏng và các hạt trong bia không bị che chắn lẫn nhau. Diện tích của bia là S (cm²), bề dày bia là d (cm). Số hạt nhân A trong bia là $n.S.d$ (hạt).



Hình 1. Sơ đồ tính tiết diện của phản ứng

Giả sử hạt tới a có khả năng phản ứng với mỗi hạt nhân A với tiết diện là σ (cm²) thì diện tích tổng cộng của n hạt nhân trong diện tích S với bề dày d là $S_A = \sigma.n.S.d$.

Cường độ phân rã của hạt nhân hợp phần ở kênh ra N_b (hạt/s) sẽ tỉ lệ với diện tích S_A [1]:

$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{S_A}{S} = \frac{\sigma.n.S.d}{S} = \sigma.n.d \quad (2)$$

Đại lượng $w = \frac{N_b}{N_a}$ gọi là suất ra của phản ứng $a + A \rightarrow b + B$.

Khi các bia mẫu đặt cùng một vị trí hình học thì hiệu suất ghi tuyệt đối của hệ phổ kế theo năng lượng của bức xạ gamma được xác định bởi:

$$\varepsilon_{abs}(E) = \frac{N - N_p}{A.I_\gamma.t} \quad (3)$$

trong đó: $\varepsilon_{abs}(E)$ là hiệu suất tuyệt đối tại năng lượng E ;

N và N_p là số đếm tổng và số đếm phông của đỉnh quang điện;

A là hoạt độ nguồn tính theo số phân rã trên giây (Bq);

I_γ là hệ số rẽ nhánh của đỉnh quang điện;

t là thời gian đo (s).

Sai số hiệu suất được xác định bởi:

$$\sigma_{\varepsilon_{abs}(E)} = \left[\left(\frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_{(N-N_p)}^2}{(N-N_p)^2} \right) (\varepsilon_{abs}(E))^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

trong đó: σ_A^2 là sai số của hoạt độ của nguồn; $\sigma_{(N-N_p)}^2$ là sai số thống kê của số đếm.

Hiệu suất tuyệt đối liên hệ với hiệu suất tương đối theo biểu thức sau [6]:

$$\varepsilon_{abs}(E) = \alpha(E)\varepsilon_{rel}(E) \quad (5)$$

Với $\varepsilon_{rel}(E)$ là hàm hiệu suất tương đối, $\alpha(E)$ tham số chuyển đổi năng lượng của detector. Trong thực nghiệm này, việc xác định $\alpha(E)$ được thực hiện bằng cách xác

định hàm hiệu suất tương đối và tuyệt đối của hệ trên toàn dải năng lượng cần quan tâm, sau đó sử dụng công thức (5) để xác định tham số chuyển đổi năng lượng.

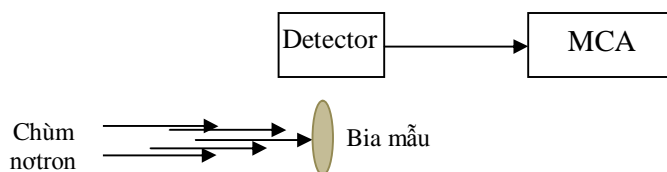
3. Thực nghiệm, kết quả và tính toán

3.1. Bố trí thực nghiệm

Thực nghiệm được tiến hành tại kênh ngang số 3 của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Thông lượng neutron nhiệt tại vị trí đặt bia mẫu là $9,25 \times 10^4$ n/cm²/s, tỉ số Cadmi so với vàng là 218 (đo với hộp Cadmi dày 1 mm), đường kính chùm neutron 1,3 cm. Bia mẫu là NH₄Cl có dạng hình học như hình 2. Đường kính của bia mẫu là 2,0 cm, bề dày 0,04 mm. Chùm neutron đi vuông góc với bia mẫu. Khoảng cách từ bia mẫu đến detector là 5cm, detector được bố trí góc 90⁰ so với bia mẫu nhằm giảm tác động của chùm neutron, xung quanh detector được bọc chì để bảo vệ và giảm nhiễu gamma từ lò phản ứng phát ra. Hệ đo thực nghiệm là hệ phổ kế gamma, sử dụng ADC 16 k, detector của hệ đo là loại bán dẫn Ge siêu tinh khiết, GMX35, đường kính 58 mm, hiệu suất ghi tương đối tại 1332 keV là 35%. Hình 3 mô tả cách bố trí thí nghiệm.



Hình 2. Mô tả hình học của bia mẫu NH₄Cl

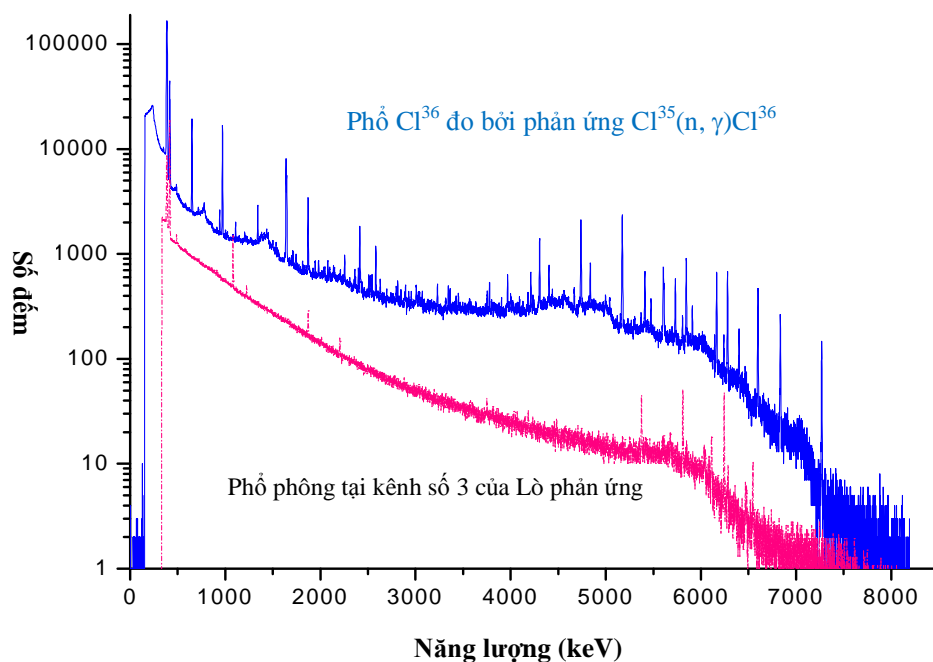


Hình 3. Sơ đồ bố trí thí nghiệm

Theo [8], Clo trong tự nhiên tồn tại hai đồng vị là Cl³⁵ và Cl³⁷. Cl³⁵ có độ phổ biến 75,76%, và tiết diện bắt neutron nhiệt là 43,6 barn. Cl³⁷ có độ phổ biến là 24,24%, và tiết diện bắt neutron nhiệt là 0,43 barn. Khi bắt neutron nhiệt, Cl³⁵ trở thành Cl³⁶ và phát gamma tức thời để về Cl³⁶ ở trạng thái cơ bản. Quá trình khử kích thích của Cl³⁶ được minh họa bởi phản ứng như phương trình (6):



Thực nghiệm được tiến hành theo trình tự hai bước đo. Đầu tiên, tiến hành khảo sát phổ, sau đó đo với bia mẫu Cl³⁵. Thời gian cho mỗi phép đo là 4200 giây. Hình 4 trình bày phổ nhiễu và phổ gamma tức thời của Cl³⁶.



Hình 4. Phổ gamma tức thời của Cl^{36} đo bởi phản ứng $Cl^{35}(n, \gamma)Cl^{36}$

3.2. Một số kết quả và tính toán

Hạt nhân Cl^{35} khi bắt neutron nhiệt tạo thành hạt nhân Cl^{36} , sau đó gần như phân rã gamma tức thời về hạt nhân Cl^{36} ở trạng thái bền. Như vậy, số hạt nhân Cl^{36} được xác định qua phương trình $N_b = N_a \cdot \sigma \cdot n \cdot d$

Với N_a là thông lượng của chùm neutron với đường kính hiệu dụng 1,3 cm, $N_a = (1,3)^2 \times 3,1415 \times 9,25 \times 10^4 \cong 491095$ neutron/giây; $\sigma = 43,6 \times 10^{-24}$ cm²; $d = 0,04$ cm; n là số hạt nhân Cl^{35} , $n = \frac{N_A m_{Cl^{35}}}{A \cdot V} = 0,19944 \times 10^{23}$ hạt / cm³, trong đó: N_A là số Avogadro, $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹; $m_{Cl^{35}}$ là khối lượng Cl^{35} trong bia mẫu, $m_{Cl^{35}} = 0,3248$ g \times 0,7576 = 0,2460 g; A là số khối, $A = 35$; V là thể tích hiệu dụng, $V = (1,3)^2 \times 3,1415 \times 0,04 \cong 0,212365$ cm³. Sai số của số hạt nhân Cl^{35} được tính trên sai số của khối lượng cân mẫu Cl^{35} (sai số dụng cụ bằng 1/2 giá trị giới hạn của cân), bằng $0,5 \times 10^{-4}$ g. Như vậy, sai số của số hạt nhân Cl^{35} là:

$$0,5 \cdot 10^{-4} \times 0,19944 \times 10^{23} \text{ hạt / cm}^3 = 0,9972 \times 10^{18} \text{ hạt / cm}^3.$$

Kết quả tính lí thuyết ta được:

$$N_b = N_a \cdot \sigma \cdot n \cdot d = 491095 \times 43,6 \cdot 10^{-24} \times 0,19944 \cdot 10^{23} \times 0,04 \cong 17081 \text{ hạt/giây.}$$

Vì thời gian xảy ra phản ứng hạt nhân rất nhỏ ($< 10^{-22}$ s) và thời gian phân rã gamma tức thời vô cùng bé ($< 10^{-14}$ s) so với thời gian thực hiện phép đo, nên xem hoạt

độ của Cl^{36} không thay đổi trong quá trình chiếu, và chính bằng số hạt nhân Cl^{36} ở trạng thái kích thích, tức nguồn có hoạt độ $A = 17081$ Bq.

Tiến hành chuẩn năng lượng trên dải từ 1 MeV đến 8,5 MeV của phổ gamma tức thời Cl^{36} , sau đó chọn lựa những đỉnh quang điện có hệ số rẽ nhánh cao và khoảng cách năng lượng giữa các đỉnh quang điện tương đối đều trên toàn dải. Hiệu suất và sai số của nó được trình bày ở bảng 1.

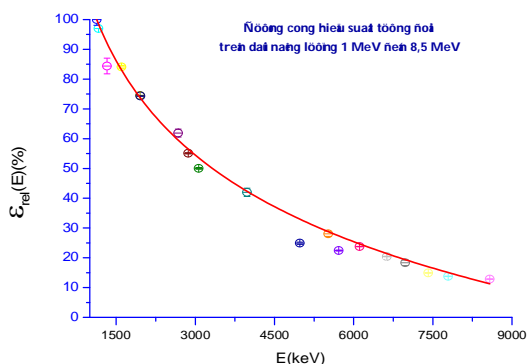
Bảng 1. Các đỉnh quang điện của Cl^{36} dùng để xây dựng hàm hiệu suất tuyệt đối từ 1 MeV ÷ 8,5 MeV

Stt	Năng lượng phát γ	Hệ số rẽ nhánh $h(I_\gamma)$ [7]	Diện tích đỉnh trừ phông	Sai số diện tích đỉnh	Hiệu suất tương đối (%)	Sai số hiệu suất tương đối (%)	Hiệu suất tuyệt đối	Sai số hiệu suất tuyệt đối
1	1131,25	1,911	4961	360	100,00	1,90	3,62E-03	1,91E-05
2	1164,87	27,2	68493	438	97,00	0,02	3,51E-03	1,44E-07
3	1327,42	1,27	2783	273	84,40	2,63	3,05E-03	2,94E-05
4	1601,08	3,484	7604	318	84,07	0,56	3,04E-03	5,32E-06
5	1951,14	19,39	37509	287	74,52	0,02	2,70E-03	1,58E-07
6	1959,36	12,56	24231	197	74,32	0,01	2,69E-03	1,78E-07
7	2676,30	1,572	2526	204	61,90	1,33	2,24E-03	1,46E-05
8	2863,82	5,77	8252	239	55,09	0,20	1,99E-03	1,67E-06
9	3061,86	3,521	4574	184	50,05	0,30	1,81E-03	2,93E-06
10	3981,06	1,028	1121	120	42,01	1,38	1,52E-03	1,74E-05
11	4979,71	3,616	2339	128	24,92	0,38	9,02E-04	2,70E-06
12	5517,20	1,689	1230	110	28,05	0,88	1,02E-03	8,12E-06
13	5715,19	5,31	3092	122	22,43	0,19	8,12E-04	1,26E-06
14	6110,85	20,58	12710	204	23,79	0,05	8,61E-04	2,22E-07
15	6619,64	7,83	4045	131	19,90	0,14	7,20E-04	7,55E-07
16	6627,75	4,69	2488	80	20,44	0,08	7,40E-04	7,64E-07
17	6977,85	2,29	1090	102	18,33	0,89	6,63E-04	5,81E-06
18	7413,95	10,52	4077	93	14,93	0,05	5,40E-04	2,81E-07
19	7790,32	8,31	2970	71	13,77	0,04	4,98E-04	2,85E-07
20	8578,59	2,739	913	39	12,84	0,07	4,65E-04	8,48E-07

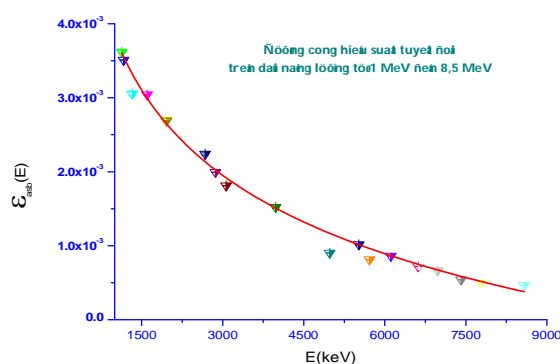
Sử dụng các hàm logarit và hàm mũ để khớp dải số liệu thực nghiệm ở bảng 1, khớp theo phương pháp bình phương tối thiểu. Quá trình khớp được thực hiện trên phần mềm Origin 8.0, lập theo phương pháp Levenberg Marquardt cho đến khi hội tụ. Bảng 2 và các Hình 5, 6, 7, 8 trình bày kết quả khớp.

Bảng 2. Tham số của các hàm hiệu suất thu được từ quá trình khớp số liệu

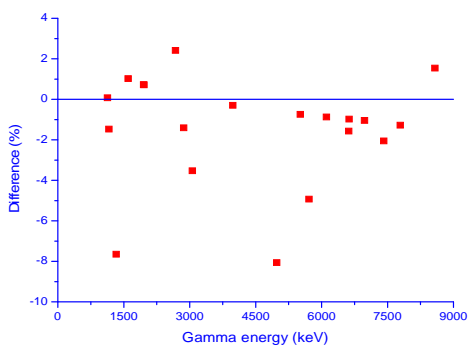
Hàm	Tham số			
$\varepsilon_{rel}(E) = a \cdot \ln(-b \cdot \ln(E))$	Tham số hàm hiệu suất tương đối.			
$R^2 = 0,99903$	a	Δa	b	Δb
	-350,02298	3,87629	-0,1069	2,55348E-4
$R^2 = 0,99863$	Tham số hàm hiệu suất tuyệt đối.			
	-0,01274	1,08485E-4	-0,10718	1,84789E-4



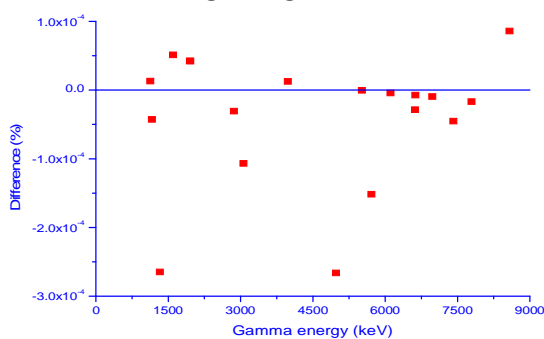
Hình 5. Đường cong hiệu suất tương đối trên dải năng lượng 1 MeV ÷ 8,5 MeV



Hình 6. Đường cong hiệu suất tuyệt đối trên dải năng lượng 1 MeV ÷ 8,5 MeV



Hình 7. Đồ thị biểu diễn thăng giáng các giá trị thực nghiệm khi khớp hàm hiệu suất tương đối trên dải năng lượng 1 MeV ÷ 8,5 MeV



Hình 8. Đồ thị biểu diễn thăng giáng các giá trị thực nghiệm khi khớp hàm hiệu suất tuyệt đối trên dải năng lượng 1 MeV ÷ 8,5 MeV

Kết quả khớp cho thấy hàm hiệu suất trên dải năng lượng từ 1 MeV đến 8,5 MeV phù hợp hơn với hàm dạng $\varepsilon(E) = a \cdot \ln(-b \cdot \ln(E))$, các tham số a, b được cho ở bảng 2. Tham số chuyển đổi năng lượng $\alpha(E)$ của detector (trong công thức 5) được xác định bằng thực nghiệm là $\alpha(E) = 3,618654E-5$.

4. Kết luận

Bằng thực nghiệm đo đạc trên kênh số 3 của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, chúng tôi đã xây dựng hàm hiệu suất tương đối và hàm hiệu suất tuyệt đối trên dải năng lượng từ 1 MeV đến 8,5 MeV, đồng thời cũng xác định được tham số chuyển đổi năng lượng giữa hiệu suất ghi thực và hiệu suất tương đối của detector. Kết quả nghiên cứu đóng góp vào việc xử lý phổ thực nghiệm, làm tăng khả năng xác định chính xác về mặt định lượng trên dải năng lượng rộng; đồng thời kết quả cũng là bước đầu để nghiên cứu tiết diện phản ứng hạt nhân ở trạng thái hợp phân trên dải năng lượng ~ 8 MeV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Ngô Quang Huy (2010), *Cơ sở lý thuyết phản ứng hạt nhân*, Nxb Khoa học và kỹ thuật.
2. Phạm Đình Khang, Nguyễn Xuân Hải, Nguyễn An Sơn, Hồ Hữu Thắng, Nguyễn Đức Hòa, Mangeno Lumengnod (2011), “Đường cong hiệu suất của phổ kế trùng phùng sử dụng hai đầu dò bán dẫn trong vùng năng lượng từ 0.5 ÷ 8 MeV”, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị khoa học và công nghệ hạt nhân toàn quốc lần thứ IX*, Nxb Khoa học và kỹ thuật, tr. 235-239.
3. Trương Thị Hồng Loan, Mai Văn Nhơn, Lê Văn Ngọc, Đặng Nguyên Phương (2007), “Mô phỏng Monte Carlo đường cong hiệu suất đỉnh của đầu dò HPGe trong hệ phổ kế gamma môi trường sử dụng chương trình MCNP4C2”, *Tạp chí phát triển KH&CN*, tập 10, số 05, tr. 33-40.
4. Hoàng Đức Tâm, Phạm Nguyễn Thành Vinh, Trịnh Hoài Vinh, Lê Thị Mộng Thuần (2010), “Xây dựng đường cong hiệu suất của hệ phổ kế gamma sử dụng nguồn chuẩn đĩa cho Phòng Thí nghiệm Vật lý Hạt nhân của Trường Đại học Sư phạm TPHCM”, *Tạp chí Khoa học Đại học Sư phạm TPHCM*, số 21, tr. 85-90.
5. A. L. Migdall, R. U. Datla, A. Sergienko, J. S. Orszak and Y. H. Shih (1995), “Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons”, *Metrologia*, 32, pp. 479-483.
6. Nguyen Van Do, Pham Duc Khue (2003), “Determination of absolute efficiency of high purity Ge detector”, *Communications in Physics*, Vol. 13, No. 4, pp. 233-239.
7. Gábor L. Molnár (2004), “Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams”, *Chemical Research Centre*, Budapest, Hungary.
8. J. Magill, G. Pfennig and J. Galy (2006), “Chart of the Nuclides”, *7th Edition*, European Communities.
9. K. Debertin and R.G Helmer (2001), *Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*, North-Holland.

(Ngày Tòa soạn nhận được bài: 21-01-2015; ngày phản biện đánh giá: 10-02-2015;
ngày chấp nhận đăng: 12-02-2015)