

NGHIÊN CỨU SỰ TĂNG BỀ DÀY LỚP GERMANIUM BẤT HOẠT TRONG DETECTOR BÁN DẪN SIÊU TINH KHIẾT BẰNG CHƯƠNG TRÌNH MCNP

Ngô Quang Huy⁽¹⁾, Đỗ Quang Bình⁽¹⁾, Võ Xuân Ân⁽²⁾

(1) Trung tâm Hạt nhân thành phố Hồ Chí Minh

(2) Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh

(Bài nhận ngày 14 tháng 9 năm 2005, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 21 tháng 12 năm 2005)

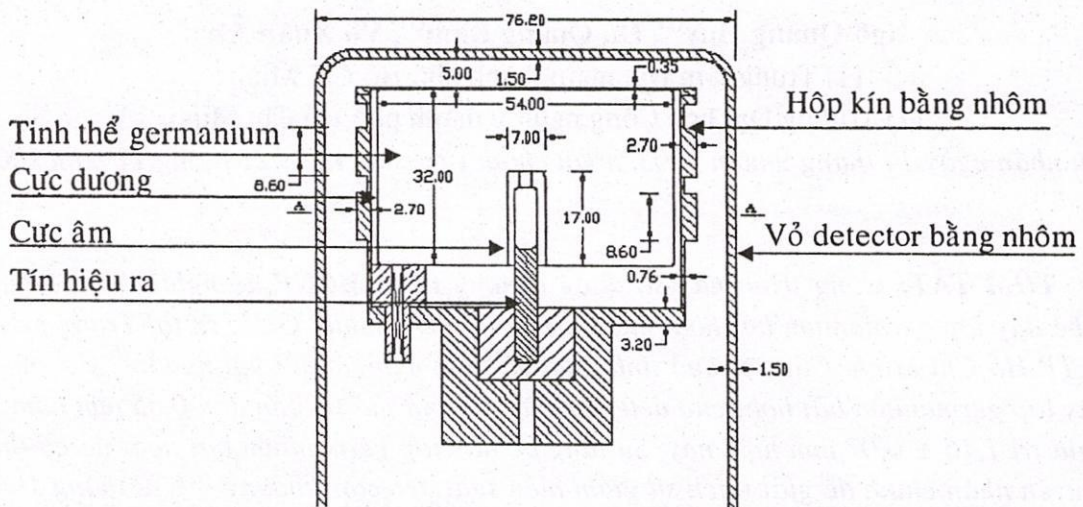
TÓM TẮT: Công trình này sử dụng chương trình MCNP để nghiên cứu hiệu ứng tăng bề dày lớp germanium bất hoạt của detector HPGe model GC1518 tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh. Các kết quả tính toán và thực nghiệm đối với nguồn ^{60}Co cho thấy bề dày lớp germanium bất hoạt của detector này tăng từ giá trị ban đầu 0,35 mm năm 1996 đến giá trị $1,16 \pm 0,07$ mm hiện nay. Sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt đó có thể coi là nguyên nhân chính để giải thích sự giảm hiệu suất detector khoảng 8% từ tháng 10/1999 đến tháng 11/2005. Tính toán theo chương trình MCNP4C2 với bề dày lớp germanium bất hoạt 1,16 mm cho kết quả về phổ gamma của các nguồn phóng xạ ^{137}Cs và ^{60}Co phù hợp với thực nghiệm hơn kết quả nêu trong công trình trước đây của chúng tôi, được tính với bề dày 0,35 mm.

1. MỞ ĐẦU

Phương pháp Monte Carlo đã được áp dụng rộng rãi trong việc mô phỏng phổ gamma của các phổ kế dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết [1-11]. Trong các công trình này kết quả tính toán thường không trùng hoàn toàn với số liệu thực nghiệm. Một trong các hiệu chỉnh để đạt được sự phù hợp giữa tính toán và thực nghiệm là thay đổi các thông số của detector so với các thông số do nhà sản xuất cung cấp. Để phân tích các hiệu chỉnh này chúng ta hãy xem xét cấu trúc của detector HPGe GC1518 của hãng Canberra Industries, Inc., đặt tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh. Bộ số liệu đầu vào về kích thước hình học cũng như cấu trúc vật liệu của detector này đã được mô tả trong công trình [12]. Phần chính của detector là tinh thể germanium có đường kính ngoài 54 mm, chiều cao 32 mm, ở giữa có một hốc hình trụ đường kính 7 mm và chiều cao 17 mm (hình 1). Tín hiệu lấy ra từ một cái lõi đặt ở hốc trong tinh thể germanium. Mặt trên và mặt bên tinh thể có một lớp lithium khuếch tán ngoài cùng với bề dày tương đương 0,35 mm Ge, được gọi là lớp germanium bất hoạt. Đó là lớp n^+ được nối với cực dương của nguồn điện. Mặt trong hốc của tinh thể có một lớp boron được cấy ion với bề dày tương đương $3 \cdot 10^{-3}$ mm Ge. Đây là lớp p^+ được nối với cực âm của nguồn điện. Trên mặt tinh thể có phủ hai lớp vật liệu, bao gồm lớp trên làm bằng kapton với bề dày 0,1 mm và lớp dưới làm bằng mylar được kim loại hóa với bề dày $8,5 \cdot 10^{-3}$ mm. Tinh thể germanium được đặt trong một hộp kín bằng nhôm và ngoài cùng là vỏ nhôm có đường kính 76,2 mm và dày 1,5 mm. Khoảng cách giữa mặt trên tinh thể germanium với mặt dưới của vỏ nhôm là 5 mm.

Trong các công trình đã công bố, các kích thước detector được điều chỉnh sao cho kết quả tính toán phù hợp với thực nghiệm [2,4,5,8,9,10,11]. Đó là bề dày lớp germanium bất hoạt, bề dày lớp boron, bề dày các lớp vật liệu khác bên trên và xung quanh tinh thể germanium, đường kính và chiều cao tinh thể germanium, khoảng cách giữa tinh thể germanium với nắp nhôm. Tuy nhiên sự thay đổi bề dày germanium bất hoạt ảnh hưởng

nhiều nhất đến kết quả tính toán và do đó trong các công trình [4,8,10] chỉ tính đến hiệu ứng này với bề dày lớp germanium bất hoạt được lấy khoảng gấp hai lần số liệu do nhà sản xuất cung cấp.



Hình 1. Mặt cắt dọc của detector HPGe Gc1518, kích thước được tính bằng mm.

Trong công trình này chúng tôi cũng khảo sát sự tăng lớp germanium bất hoạt và ảnh hưởng của sự tăng đó đến sự giảm hiệu suất detector cũng như dạng các phổ gamma. Lớp germanium bất hoạt là một lớp germanium có pha lithium theo phương pháp khuếch tán, nó trở thành một lớp vật liệu không thu góp năng lượng của các bức xạ mà chỉ là một lớp vật liệu hấp thụ và tán xạ thuần túy. Bề dày lớp germanium bất hoạt có giá trị nhỏ nhất khi detector vừa xuất xưởng và tăng dần nếu detector để ở nhiệt độ cao một thời gian dài do lithium tiếp tục khuếch tán vào sâu trong thể tích tinh thể germanium [3,13]. Sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt dẫn đến sự giảm hiệu suất detector do hai lý do sau đây. Thứ nhất, sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt làm tăng hiệu ứng hấp thụ và tán xạ của các tia gamma, dẫn tới sự suy giảm diện tích các quang đỉnh và do đó giảm hiệu suất detector. Thứ hai, khi lớp germanium bất hoạt tăng thì thể tích khối germanium hoạt động sẽ giảm, cũng làm giảm hiệu suất ghi của detector. Hiệu ứng tăng bề dày lớp germanium bất hoạt của detector HPGe GC1518 tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh trong gần 10 năm hoạt động là mục tiêu nghiên cứu của công trình này. Công cụ tính toán là chương trình MCNP4C2 [14].

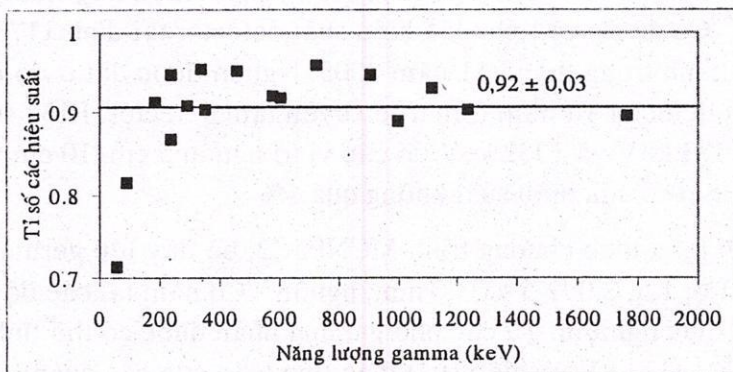
2. XÁC ĐỊNH THỰC NGHIỆM SỰ GIẢM HIỆU SUẤT DETECTOR HPGE GC1518 TẠI TRUNG TÂM HẠT NHÂN TPHCM SAU GẦN 10 NĂM HOẠT ĐỘNG

Hệ phổ kế dùng detector HPGe GC1518 tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh bắt đầu hoạt động năm 1996. Trong quá trình làm việc hệ đo nghỉ gián đoạn khoảng 50 ngày trong năm 1999, 20 ngày trong năm 2000, 50 ngày trong năm 2002, 20 ngày trong năm 2003 và 40 ngày trong ba tháng đầu năm 2005. Với thời gian tổng cộng khoảng 180 ngày trong điều kiện nhiệt độ cao từ năm 1999 đến nay, bề dày lớp germanium bất hoạt có thể tăng lên đáng kể. Với hai hiệu ứng tăng lớp germanium bất hoạt và giảm thể tích khối germanium hoạt động, hiệu suất detector có thể giảm đi so với ban đầu. Để xác định mức độ giảm hiệu suất này, chúng tôi sử dụng hai mẫu zircon $ZrSiO_4$, ký hiệu là Zircon-1 và Zircon-2, nhốt bằng dung môi keo ngày 6/10/1999, đã đo ngày 29/10/1999 và đo lặp lại ngày 24/8/2005. Các quang đỉnh được đo là các tia gamma do các hạt nhân trong các dây

^{238}U , ^{235}U và ^{232}Th phát ra. Với hai lần đo nói trên quá trình cân bằng giữa ^{226}Ra và các con cháu của chúng được thiết lập nên có thể sử dụng các quang đỉnh của ^{214}Pb và ^{214}Bi trong dãy ^{238}U . Bảng 1 nêu tỉ số các số đếm trong đơn vị thời gian đối với từng quang đỉnh của hai mẫu Ziricon-1 và Ziricon-2 giữa hai lần đo 24/8/2005 và 29/10/1999. Sai số tương đối của các phép đo không quá 2%. Cột 4 của bảng 1 và hình 2 trình bày tỉ số trung bình của hai mẫu Ziricon-1 và Ziricon-2 phụ thuộc vào năng lượng tia gamma. Bảng 1 và hình 2 cho thấy các tỉ số đều bé hơn 1, có nghĩa là hiệu suất của detector đã giảm trong lần đo ngày 24/8/2005 so với lần đo ngày 29/10/1999. Từ hình 2 thấy rằng trong miền năng lượng dưới 100 keV, tỉ số hiệu suất giảm rất mạnh, đạt đến 0,71 ở năng lượng 63 keV và 0,81 ở năng lượng 92 keV. Trong miền từ khoảng 200 keV đến 1800 keV, tỉ số các hiệu suất thẳng giáng quanh giá trị trung bình $0,92 \pm 0,03$. Như vậy trong khoảng thời gian này hiệu suất detector đã giảm đi cỡ 8% trong miền 200 – 1800 keV.

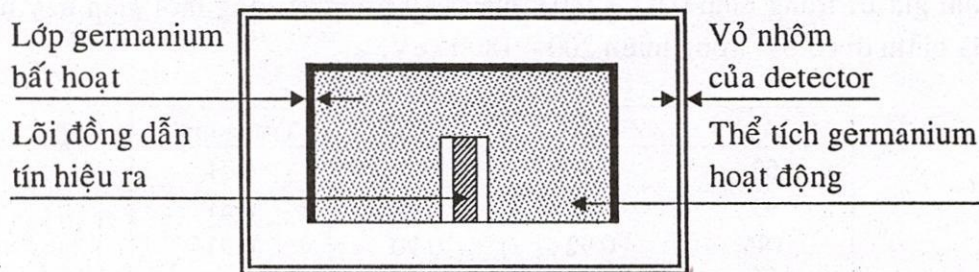
E_γ (keV)	Ziricon-1	Ziricon-2	Trung bình
63	0.63	0.79	0.71
92	0.84	0.78	0.81
185	0.92	0.90	0.91
238	0.90	0.95	0.95
241	0.84	0.89	0.87
295	0.90	0.92	0.91
338	0.9	0.94	0.95
352	0.90	0.91	0.90
464	0.99	0.92	0.95
583	0.90	0.94	0.92
609	0.91	0.93	0.92
727	0.94	0.98	0.96
911	0.94	0.96	0.95
1001	0.94	0.84	0.89
1120	0.91	0.95	0.93
1238	0.91	0.90	0.90
1763	0.88	0.91	0.90

Bảng 1. Sự phụ thuộc năng lượng tia gamma của tỉ số hiệu suất của detector đo ngày 24/8/2005 so với ngày 29/10/1999 đối với hai mẫu Ziricon-1 và Ziricon-2.



Hình 2. Sự phụ thuộc vào năng lượng tia gamma của tỉ số giữa hiệu suất trung bình của hai mẫu Ziricon-1 và Ziricon-2 đo ngày 24/8/2005 so với ngày 29/10/1999. Giá trị $0,92 \pm 0,03$ là tỉ số trung bình và độ lệch chuẩn của nó trong khoảng năng lượng từ 200keV đến 1800 keV.

Để giải thích hiện tượng giảm hiệu suất detector, hãy xét ảnh hưởng của sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt (Hình 3). Bề dày lớp germanium bất hoạt càng tăng thì thể tích khối germanium hoạt động càng giảm, dẫn tới sự giảm hiệu suất detector. Sự phụ thuộc của thể tích germanium hoạt động vào bề dày lớp germanium bất hoạt được nêu trên bảng 2, trong đó các giá trị bề dày được lấy là 0,35; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 và 3,0 mm. Thể tích khối germanium hoạt động giảm từ 69,96 cm³ khi d = 0,35 mm đến 51,82 cm³ khi d = 3,0 mm. Giả sử hiệu suất tỉ lệ thuận với thể tích khối germanium hoạt động, bỏ qua hiệu ứng hấp thụ và tán xạ trong lớp germanium bất hoạt, thì để hiệu suất detector giảm đi 8%, theo bảng 2, bề dày lớp germanium bất hoạt tăng từ 0,35 mm năm 1999 đến khoảng 1,1 mm hiện nay.



Hình 3. Tinh thể germanium và lớp germanium bất hoạt. Kích thước trên hình vẽ không tỉ lệ với kích thước thật để dễ nhận biết.

d (mm)	0.35	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
V (cm ³)	69.96	67.32	65.18	61.65	58.25	54.98	51.82
V/V _{0.35}	1.00	0.96	0.93	0.88	0.83	0.79	0.74
Độ suy giảm thể tích (%)	0	4	7	12	17	21	26

Bảng 2. Sự phụ thuộc vào bề dày lớp germanium bất hoạt của thể tích germanium hoạt động, tỉ số của chúng so với thể tích ban đầu và độ suy giảm thể tích.

3. XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LỚP GERMANIUM BẤT HOẠT BẰNG CHƯƠNG TRÌNH MCNP4C2

Để xác định được bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay chúng tôi sử dụng nguồn phóng xạ chuẩn ⁶⁰Co để đo và tính toán hiệu suất detector tại đỉnh 1173 keV và 1332 keV. Thí nghiệm tiến hành trong tháng 11 năm 2005. Nguồn được đặt ở độ cao 5 cm, 10 cm và 15 cm so với mặt detector và nằm trên trục xuyên tâm detector. Hiệu suất detector đối với các quang đỉnh 1173 keV và 1332 keV tại các vị trí nguồn 5 cm, 10 cm và 15 cm được trình bày trên bảng 3. Sai số của hiệu suất không quá 1%.

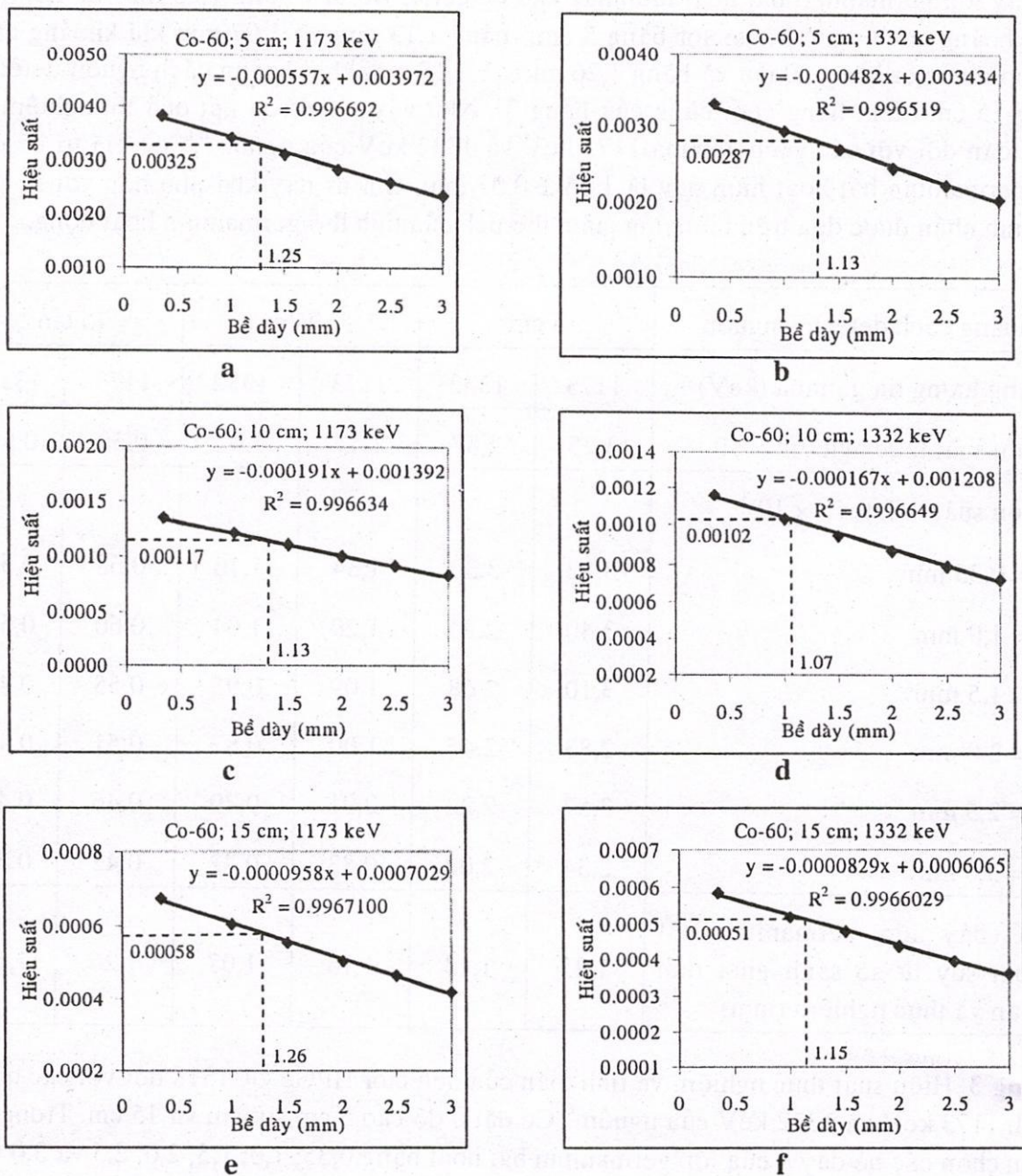
Trong tính toán theo chương trình MCNP4C2, bề dày lớp germanium bất hoạt được chọn bằng 0,35; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 và 3,0 mm; nguồn ⁶⁰Co nằm tại các độ cao 5 cm, 10 cm và 15 cm giống như thực nghiệm. Từ các phổ gamma nhận được có thể tính số đếm của quang đỉnh 1173 keV và 1332 keV và hiệu suất theo tính toán của các quang đỉnh này, đó là tỉ số giữa số đếm của quang đỉnh so với số tia gamma phát ra của nguồn. Bảng 3 và hình 4 trình bày sự phụ thuộc của hiệu suất tính toán theo bề dày lớp germanium bất hoạt. Từ hình 4 thấy rằng các giá trị hiệu suất tính toán giảm tuyến tính khi tăng bề dày và được làm khớp với các đường thẳng. So sánh các giá trị thực nghiệm với các đường tính toán suy ra được

bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay của detector. Bề dày bằng 1,25 mm và 1,13 mm khi khoảng cách nguồn-detector bằng 5 cm, bằng 1,13 mm và 1,07 mm khi khoảng cách nguồn-detector bằng 10 cm và bằng 1,26 mm và 1,15 mm khi khoảng cách nguồn-detector bằng 15 cm (xem hàng cuối cùng của bảng 3). Như vậy, dựa trên kết quả thí nghiệm và tính toán đối với các vạch gamma 1173 keV và 1332 keV của nguồn ^{60}Co , giá trị bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay là $1,16 \pm 0,07$ mm. Giá trị này khá phù hợp với bề dày 1,1 mm nhận được dựa trên hiệu ứng giảm thể tích của tinh thể germanium hoạt động.

Khoảng cách detector-nguồn	5 cm		10 cm		15 cm	
	1173	1332	1173	1332	1173	1332
Năng lượng tia gamma (keV)	1173	1332	1173	1332	1173	1332
Hiệu suất thực nghiệm $\times 10^{-3}$	3,25	2,87	1,17	1,02	0,58	0,51
Hiệu suất tính toán $\times 10^{-3}$						
d = 0,35 mm	3,82	3,30	1,34	1,16	0,68	0,58
d = 1,0 mm	3,40	2,94	1,20	1,04	0,60	0,52
d = 1,5 mm	3,10	2,68	1,09	0,95	0,55	0,48
d = 2,0 mm	2,83	2,45	1,00	0,87	0,51	0,44
d = 2,5 mm	2,57	2,22	0,91	0,79	0,46	0,40
d = 3,0 mm	2,34	2,02	0,83	0,72	0,42	0,36
Bề dày lớp germanium bất hoạt suy từ so sánh giữa tính toán và thực nghiệm (mm)	1,25	1,13	1,13	1,07	1,26	1,15

Bảng 3. Hiệu suất thực nghiệm và tính toán của detector HPGe GC1518 đối với các quang đỉnh 1173 keV và 1332 keV của nguồn ^{60}Co đặt ở độ cao 5 cm, 10 cm và 15 cm. Trong tính toán chọn các bề dày d của lớp germanium bất hoạt bằng 0,35; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 và 3,0 mm.

Như đã nói ở trên, sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt một mặt làm giảm độ cao các quang đỉnh, dẫn đến sự giảm hiệu suất detector, mặt khác làm tăng số gamma tán xạ Compton trong miền năng lượng dưới vạch năng lượng của quang đỉnh. Hiệu ứng này được sử dụng để giải thích sự khác biệt giữa tính toán và thực nghiệm trong công trình [12], trong đó các phổ gamma của các nguồn ^{137}Cs và ^{60}Co được mô phỏng bằng chương trình MCNP4C2. Các phổ gamma tính toán được so sánh với các phổ thực nghiệm bằng cách chuẩn các quang đỉnh tính toán theo các quang đỉnh thực nghiệm đối với đỉnh 662 keV (^{137}Cs) và 1332 keV (^{60}Co). Các tính toán trong công trình [12] được thực hiện với giá trị d = 0,35 mm của bề dày lớp germanium bất hoạt, khi đó các phổ gamma tính toán thấp hơn các phổ thực nghiệm một ít. Trên hình 5 dẫn ra các phổ gamma tính toán với d = 1,16 mm. Ta thấy rằng các phổ gamma này được nâng cao lên và trùng với các phổ thực nghiệm trong miền năng lượng 0,2 - 0,6 MeV đối với ^{137}Cs và 0,25 - 1,10 MeV đối với ^{60}Co .

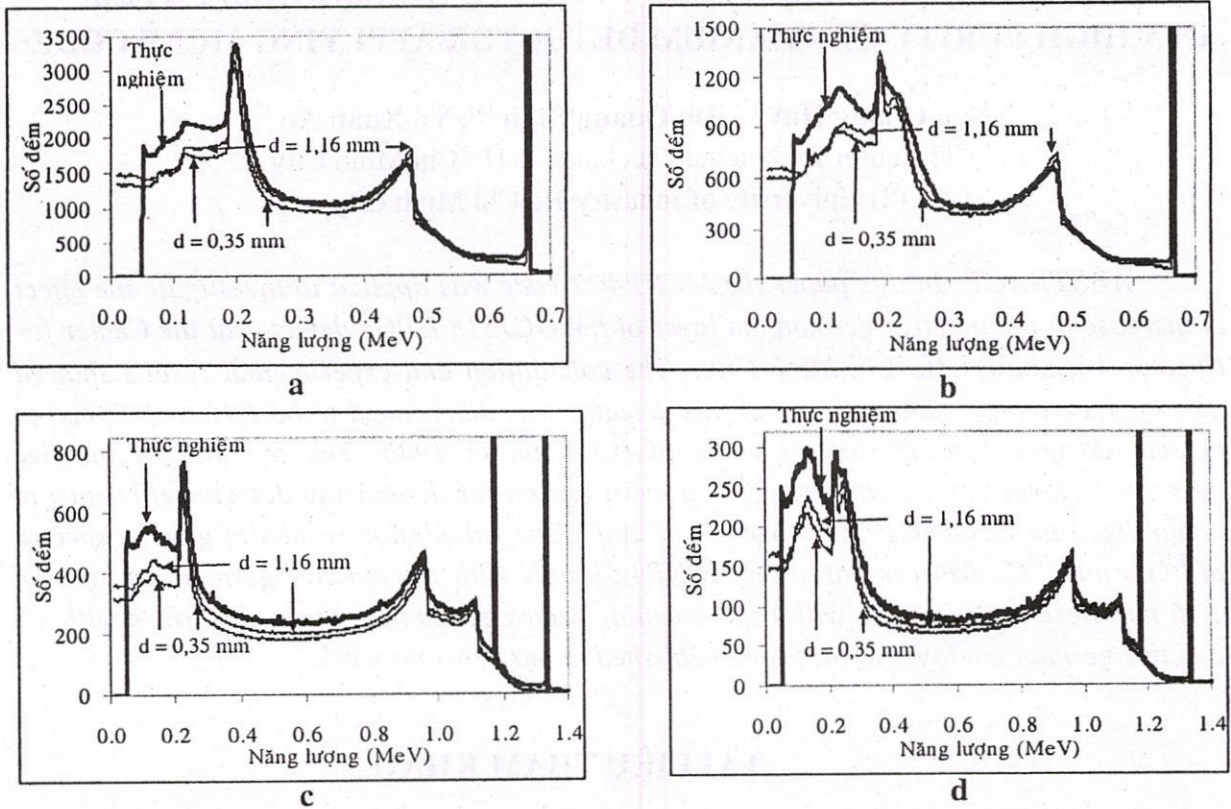


Hình 4. Sự phụ thuộc hiệu suất tính toán của detector vào bề dày lớp germanium bất hoạt.

— Đường làm khớp tính toán; - - - - - So sánh với thực nghiệm

a) Khoảng cách detector-nguồn $h = 5$ cm, $E_\gamma = 1173$ keV; b) $h = 5$ cm, $E_\gamma = 1332$ keV; c) $h = 10$ cm, $E_\gamma = 1173$ keV; d) $h = 10$ cm, $E_\gamma = 1332$ keV; e) $h = 15$ cm, $E_\gamma = 1173$ keV; f) $h = 15$ cm, $E_\gamma = 1332$ keV.

Như vậy việc sử dụng bề dày germanium bất hoạt 1,16 mm để tính toán theo chương trình MCNP có thể giải thích được hiện tượng giảm hiệu suất cỡ 8% của detector từ năm 1999 đến nay và làm phù hợp hơn giữa phổ gamma tính toán và thực nghiệm đối với các nguồn phóng xạ ^{137}Cs và ^{60}Co .



Hình 5. Các phổ gamma của các nguồn phóng xạ: a) Nguồn ^{137}Cs độ cao 5 cm; b) Nguồn ^{137}Cs độ cao 10 cm; c) Nguồn ^{60}Co độ cao 5 cm; d) Nguồn ^{60}Co độ cao 10 cm. Các phổ tính toán được chuẩn theo các phổ thực nghiệm tại các quang đỉnh 662 keV (^{137}Cs) và 1332 keV (^{60}Co).

4. KẾT LUẬN

Trong công trình này sử dụng chương trình MCNP để xác định bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay của detector HPGe GC1518 tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh. Các kết quả tính toán và thực nghiệm đối với nguồn ^{60}Co cho thấy bề dày germanium bất hoạt đã tăng từ 0,35 mm năm 1996 đến $1,16 \pm 0,07$ mm vào tháng 11/2005. Sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt đó có thể coi là nguyên nhân chính để giải thích sự giảm hiệu suất detector khoảng 8% từ tháng 10/1999 đến tháng 11/2005. Tính toán theo chương trình MCNP4C2 với bề dày lớp germanium bất hoạt 1,16 mm cho kết quả về phổ gamma của các nguồn phóng xạ ^{137}Cs và ^{60}Co phù hợp với thực nghiệm hơn kết quả nêu trong công trình [12], được tính với bề dày 0,35 mm. Tuy nhiên vẫn còn sự khác biệt giữa phổ gamma tính toán so với thực nghiệm trong miền năng lượng dưới đỉnh tán xạ ngược 200-250 keV.

Cảm ơn: Các tác giả bày tỏ sự cảm ơn chân thành đến CN Nguyễn Văn Mai, TS Trần Văn Luyến, Th.S Thái Mỹ Phê và các đồng nghiệp trong Phòng An toàn Bức xạ và Môi trường thuộc Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện thuận lợi trong việc đo đạc trên hệ phổ kế gamma và các ý kiến thảo luận bổ ích.

STUDY ON THE INCREASE OF INACTIVE GERMANIUM LAYER IN A HIGH PURITY GERMANIUM DETECTOR APPLYING MCNP CODE

Ngo Quang Huy ⁽¹⁾, Do Quang Binh ⁽¹⁾, Vo Xuan An ⁽²⁾

(1) Center for Nuclear Techniques Ho Chi Minh City

(2) University of Industry Ho Chi Minh City

ABSTRACT: *In this paper the MCNP4C2 code was applied to investigate the effect of increase of the inactive germanium layer of the GC1518 HPGe detector at the Center for Nuclear Techniques Ho Chi Minh City. The calculation and experimental results showed that the inactive germanium layer of this detector was determined to be $1,16 \pm 0,07$ mm at present compared to the initial value of 0.35 mm in 1996. The increase of inactive germanium layer can be considered as a main reason for decreasing detector efficiency of about 8% from October 1999 to November 2005. The calculation results of gamma spectra of ^{137}Cs and ^{60}Co sources based on MCNP4C2 code with the inactive germanium layer of 1.16 mm were in agreement with experimental spectra better than those performed with the inactive germanium layer of 0.35 mm, published in our previous work.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ch. Meixner, *A Monte Carlo program for the calculation of gamma-ray spectra for Germanium detectors*, Nuclear Instruments and Methods, 119, 521-526, 1974.
- [2]. M. Garcia-Talavera, H. Nader, M.J. Daza, B. Quintana, *Towards a proper modeling of detector and source characteristics in Monte Carlo simulations*, Applied Radiation and Isotopes, 52, 777-783, 2000.
- [3]. J.M. Laborie, G. Le Petit, D. Abt, M. Girard, *Monte Carlo calculation of the efficiency calibration curve and coincidence-summing corrections in low-level gamma-ray spectrometry using well-type HPGe detectors*, Applied Radiation and Isotopes, 53, 57-62, 2000.
- [4]. I.O.B. Ewa, D. Bodizs, Sz. Czifrus, Zs. Molnar, *Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for an HPGe detector*, Applied Radiation and Isotopes, 55, 103-108, 2001.
- [5]. J.C. Hardy, V.E. Jacob, M. Sanchez-Vega, R.T. Effinger, P. Lipnik, V.E. Mayes, D.K. Willis, R.G. Helmer. *Precise efficiency calibration of an HPGe detector: source measurements and Monte Carlo calculations with sub-percent precision*. Applied Radiation and Isotopes, 56, 65-69, 2002.
- [6]. M. Jurado Vargas, A. Fernandez Timon, N. Cornejo Diaz and D. Perez Sanchez, *Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma ray spectrometry*, Applied Radiation and Isotopes, 57, 202-898, 2002.
- [7]. O. Sima and D. Arnold, *Transfer of the efficiency calibration of Germanium gamma-ray detectors using the GESPECOR software*, Applied Radiation and Isotopes, 56, 71-75, 2002.

- [8]. J. Rodenas, A. Pascual, I. Zarza, V. Serradell, J. Ortiz, L. Ballesteros, *Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 496, 390-399, 2003.
- [9]. M. Jurado Vargas, N. Cornejo Diaz and D. Perez Sanchez, *Efficiency transfer in the calibration of a coaxial p-type HPGe detector using the Monte Carlo method*, Applied Radiation and Isotopes, 58, 707-712, 2003.
- [10]. R.G. Helmer, N. Nica, J.C. Hardy, V.E. Jacob, *Precise efficiency calibration of an HPGe detector up to 3.5 MeV with measurements and Monte-Carlo calculations*, Applied Radiation and Isotopes, 60, 173-177, 2004.
- [11]. S. Hurtado, M. Garcia-Leon, R. Garcia-Tenorio, *GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration*, Nuclear Instruments and Methods in Nuclear Research. A 518, 764-774, 2004.
- [12]. Ngô Quang Huy, Đỗ Quang Bình, Võ Xuân Ân, *Bước đầu mô hình hóa hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết sử dụng chương trình MCNP*, Tạp chí phát triển Khoa học và Công nghệ, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, Tập 8, Trang 17-25, 2005.
- [13]. Glenn F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sons, Second edition, 1989.
- [14]. J.F. Briesmeister, *MCNP-A general Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, Los Alamos, LA-13709-M, 2000.