

MÔ PHỎNG CÁC PHỔ GAMMA PHỨC TẠP ĐO TRÊN HỆ PHỔ KẾ GAMMA DÙNG DETECTOR HPGe BẰNG CHƯƠNG TRÌNH MCNP

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

(1) Trường Đại học Công nghiệp TP Hồ Chí Minh

(2) Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh

(Bài nhận ngày 27 tháng 02 năm 2006, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 23 tháng 08 năm 2006)

TÓM TẮT: Bài báo này trình bày các kết quả thu được từ việc sử dụng chương trình MCNP trong nghiên cứu mô phỏng các phổ gamma phức tạp của ^{131}I , dãy ^{238}U và dãy ^{232}Th đo trên hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe GC1518 của hãng Canberra Industries Inc. và hộp chứa mẫu dạng Marinelli. Trong tính toán sử dụng bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay của detector là $d = 1,16 \pm 0,07$ mm, được xác định trong công trình trước đây của chúng tôi.

Kết quả tính toán phổ gamma được so sánh với số liệu thực nghiệm đối với ba nguồn phóng xạ ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th . Việc so sánh cho thấy rằng kết quả tính toán phù hợp tốt hơn với thực nghiệm khi tăng bề dày lớp germanium bất hoạt từ 0,35 mm lên 1,16 mm. Cụ thể là, đối với trường hợp $d = 0,35$ mm tỉ số giữa các diện tích quang đỉnh tính toán và thực nghiệm lớn hơn 1 đáng kể trong miền năng lượng dưới 200 keV và dao động quanh giá trị 1 trong miền năng lượng trên 200 keV. Trong lúc đó đối với trường hợp $d = 1,16$ mm tỉ số này xấp xỉ 1 trong toàn dải năng lượng từ 63,3 keV đến 1847,3 keV.

1. MỞ ĐẦU

Phương pháp Monte Carlo là công cụ toán học ưu việt cho phép mô phỏng các quá trình tương tác phức tạp của bức xạ gamma với vật chất. Đối với hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe (High Purity Germanium), bài toán mô phỏng phổ gamma được thực hiện trong hơn 20 năm qua, trong đó các công trình công bố từ năm 2000 đến nay [1-10] tiến hành nghiên cứu khá chi tiết cấu trúc detector.

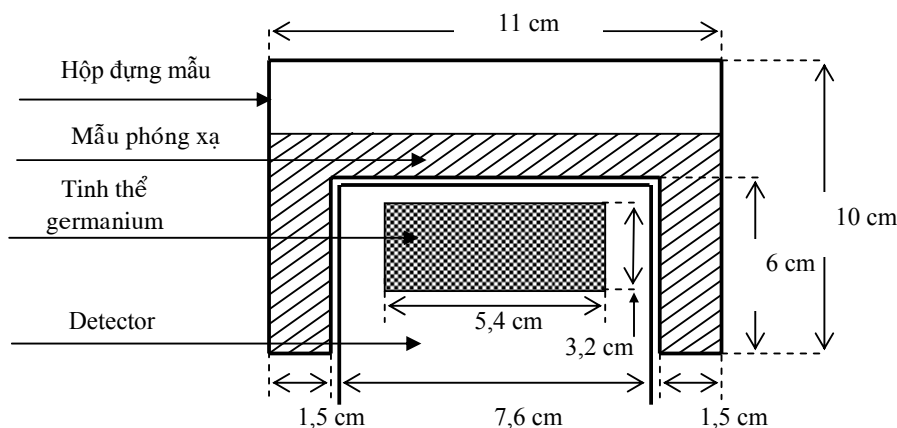
Trong các công trình này, để đạt được sự phù hợp giữa tính toán và thực nghiệm, các tác giả đã điều chỉnh các thông số hình học của detector so với các thông số do nhà sản xuất cung cấp. Trong các thông số đó, bề dày lớp germanium bất hoạt đóng vai trò quan trọng nhất vì nó khá nhạy đối với hiệu suất detector [2,3,7,8].

Tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh, chương trình MCNP4C2 được ứng dụng để mô phỏng phổ các gamma được đo trên detector HPGe GC1518 của hãng Canberra Industries Inc. [11,12]. Cấu trúc hình học và thành phần vật liệu của hệ đo và detector HPGe GC1518 được miêu tả trong công trình [11]. Công trình [12] nghiên cứu ảnh hưởng của lớp germanium bất hoạt lên hiệu suất detector và xác định bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay bằng $1,16 \pm 0,07$ mm, trong khi đó bề dày lớp này do nhà sản xuất đo được năm 1996 là 0,35 mm. Trong cả hai công trình [11] và [12] chỉ khảo sát các nguồn phóng xạ điểm ^{137}Cs và ^{60}Co với dạng phổ đơn giản.

Bài báo này trình bày các kết quả tính toán theo chương trình MCNP4C2 đối với hệ phổ kế gamma với các nguồn phóng xạ có dạng hộp Marinelli, kiểu hình học 3π . Ba nguồn phóng xạ được sử dụng là dung dịch NaI chứa các hạt nhân ^{131}I , bột đất chứa các hạt nhân dãy ^{238}U và bột đất chứa các hạt nhân dãy ^{232}Th . Mục tiêu của bài báo này là nghiên cứu sự ảnh hưởng của bề dày lớp germanium bất hoạt của detector lên các quang đỉnh của các phổ gamma của ^{131}I , dãy ^{238}U và dãy ^{232}Th được đo trên hệ phổ kế gamma với detector HPGe GC1518 và hộp chứa mẫu dạng Marinelli.

2. THỰC NGHIỆM VÀ TÍNH TOÁN

Bố trí hình học của detector và hộp đựng mẫu Marinelli được minh họa trên hình 1. Mẫu dung dịch NaI chứa ^{131}I do Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt sản xuất. Các mẫu đất chứa ^{238}U và ^{232}Th do Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân Hà Nội cung cấp. Thành phần hóa học của mẫu ^{131}I chủ yếu là H_2O , lượng NaI không đáng kể. Thành phần đất trong các mẫu ^{238}U và ^{232}Th gồm 71,33% CaCO_3 ; 24,84% MgCO_3 và phần còn lại 3,83% là các chất khác [13]. Mẫu ^{238}U chứa ^{238}U với hàm lượng $(1,05 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ g/g và ^{232}Th với hàm lượng $(1,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$ g/g. Mẫu ^{232}Th chứa ^{232}Th với hàm lượng $(1,29 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$ g/g và ^{238}U với hàm lượng $(9,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$ g/g. Như vậy mẫu ^{238}U chủ yếu chứa các hạt nhân trong dãy ^{238}U còn mẫu ^{232}Th chủ yếu chứa các hạt nhân trong dãy ^{232}Th . Tuy nhiên dãy ^{232}Th cũng có đóng góp đáng kể vào phổ gamma của ^{238}U và ngược lại, dãy ^{238}U có đóng góp đáng kể vào phổ gamma của ^{232}Th . Các mẫu có khối lượng 500 g, choáng gần đầy hộp đựng mẫu, bề mặt mẫu cao cỡ 10 cm so với mặt đáy trên của hộp đựng mẫu. Hình 1 cho thấy mẫu bao kín ba phía của tinh thể germanium. Hộp đựng mẫu ^{238}U được nhốt kín và đo sau 30 ngày kể từ ngày nhốt để đạt được sự cân bằng của các hạt nhân ^{214}Pb và ^{214}Bi với hạt nhân ^{226}Ra . Ba mẫu này được đo trong tháng 10 năm 2005. Các vạch năng lượng gamma chính đối với ba mẫu ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th được dẫn ra trên các bảng 1, 2 và 3 tương ứng.



Hình 1. Bố trí hình học của detector và hộp đựng mẫu Marinelli.

Việc tính toán Monte Carlo được thực hiện theo chương trình MCNP4C2 với các kích thước hình học và thành phần vật liệu của hệ đo như nêu ra trong công trình [11]. Ngoài ra trong tính toán, kích thước và thành phần vật liệu của nguồn phóng xạ được nêu trong mục 1, còn suất ra đối với các tia gamma của hạt nhân ^{131}I , các hạt nhân trong các dãy ^{238}U và ^{232}Th được lấy từ công trình [14] và nêu ra trên cột 3 của các bảng 1, 2 và 3. Trong công trình [12], các phép đo thực nghiệm và tính toán Monte Carlo đối với nguồn chuẩn ^{60}Co cho thấy có thể lấy bề dày hiện nay của lớp germanium bất hoạt là 1,16 mm thay cho bề dày 0,35 mm do nhà sản xuất đo được năm 1996. Vì vậy các tính toán đối với các nguồn ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th được thực hiện đối với hai giá trị bề dày 0,35 mm và 1,16 mm.

3. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

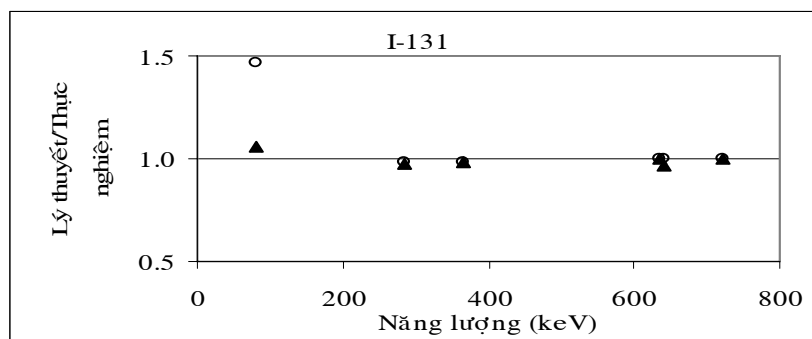
3.1. Nguồn ^{131}I

Bảng 1 trình bày kết quả thực nghiệm và tính toán đối với nguồn ^{131}I . Cột 4 là diện tích các quang đỉnh thực nghiệm với sai số thống kê không vượt quá 2%. Cột 5 là diện tích các quang đỉnh tính toán với bề dày lớp germanium bất hoạt 0,35 mm, được chuẩn theo thực nghiệm đối với diện tích quang đỉnh 722,3 keV. Đỉnh này được chọn vì nó có năng lượng

lớn nhất nên không bị ảnh hưởng bởi nền phong Compton của các đỉnh có năng lượng cao hơn. Cột 6 là kết quả tính toán đối với bề dày lớp germanium bất hoạt 1,16 mm và cũng được chuẩn theo đỉnh 722,3 keV. Các cột 7 và 8 là tỉ số giữa các diện tích quang đỉnh tính toán với diện tích quang đỉnh thực nghiệm với cùng một vạch năng lượng đối với các bề dày lớp germanium bất hoạt 0,35 mm và 1,16 mm tương ứng. Hình 2 minh họa sự phụ thuộc của các tỉ số này vào năng lượng các tia gamma. Từ bảng 1 và hình 2 thấy rằng tỉ số giữa diện tích các quang đỉnh tính toán và thực nghiệm trong hai trường hợp bề dày lớp germanium bất hoạt $d = 0,35$ mm và $d = 1,16$ mm gần bằng 1 đối với các giá trị năng lượng từ 284,2 keV trở lên. Còn đối với năng lượng tia gamma 80,2 keV, tỉ số đó bằng 1,47 trong trường hợp $d = 0,35$ mm và bằng 1,05 trong trường hợp $d = 1,16$ mm. Ngoài ra giá trị trung bình của tỉ số giữa tính toán và thực nghiệm trong trường hợp $d = 0,35$ mm bằng $1,07 \pm 0,19$ còn trong trường hợp $d = 1,16$ mm bằng $1,00 \pm 0,03$. Như vậy việc thay bề dày lớp germanium bất hoạt từ 0,35 mm lên 1,16 mm làm tốt hơn sự phù hợp giữa tính toán và thực nghiệm, đặc biệt đối với đỉnh 80,2 keV.

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm và tính toán đối với các quang đỉnh của mẫu dung dịch ^{131}I .

STT	E (keV)	Suất ra (%)	Thực nghiệm	Tính toán		Tỉ số	
				$d = 0,35$ mm	$d = 1,16$ mm	$d = 0,35$ mm	$d = 1,16$ mm
1	80,2	2,62	38188	56054	40285	1,47	1,05
2	284,2	6,06	80868	79386	78892	0,98	0,98
3	364,3	81,21	837148	823448	821268	0,98	0,98
4	636,5	7,27	42391	42566	42497	1,00	1,00
5	642,2	0,22	1216	1213	1176	1,00	0,97
6	722,3	1,80	9418	9418	9418	1,00	1,00
Trung bình $\pm$ Độ lệch chuẩn						$1,07 \pm 0,19$	$1,00 \pm 0,03$



Hình 2. Sự phụ thuộc của tỉ số diện tích các quang đỉnh tính toán so với thực nghiệm vào năng lượng các tia gamma của nguồn ^{131}I .

○ Trường hợp $d = 0,35$ mm; ▲ Trường hợp $d = 1,16$ mm

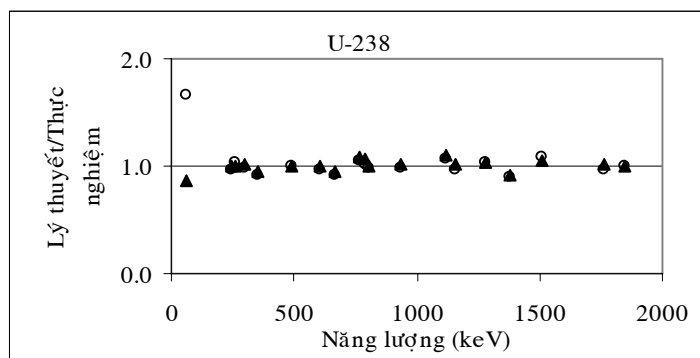
3.2. Nguồn ^{238}U

Bảng 2 và hình 3 trình bày các kết quả thực nghiệm và tính toán đối với nguồn ^{238}U , tương tự như đã trình bày đối với nguồn ^{131}I . Các giá trị diện tích quang đỉnh tính toán được chuẩn theo thực nghiệm đối với vạch năng lượng 1847,3 keV. Đỉnh 1847,3 keV được chọn vì nó có năng lượng lớn và suất ra lớn, còn các quang đỉnh với năng lượng lớn hơn có suất ra bé, không tạo nên nền phong Compton đáng kể lên quang đỉnh này. Từ bảng 2 và hình 3 thấy rằng việc thay bề dày lớp germanium bất hoạt từ 0,35 mm lên 1,16 mm cũng làm tốt hơn sự

phù hợp giữa tính toán và thực nghiệm, đặc biệt đối với đỉnh 63,3 keV. Thật vậy, tỉ số giữa diện tích các quang đỉnh tính toán và thực nghiệm trong hai trường hợp bề dày lớp germanium bất hoạt $d = 0,35$ mm và $d = 1,16$ mm gần bằng 1 đối với các giá trị năng lượng từ 241,9 keV trở lên. Còn đối với giá trị năng lượng 63,3 keV tỉ số này bằng 1,67 trong trường hợp $d = 0,35$ mm và giảm xuống bằng 0,87 trong trường hợp $d = 1,16$ mm. Ngoài ra giá trị trung bình trong trường hợp $d = 0,35$ mm bằng $1,03 \pm 0,16$ chuyển thành $1,00 \pm 0,06$ trong trường hợp $d = 1,16$ mm.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm và tính toán đối với các quang đỉnh của mẫu ^{238}U

STT	E (keV)	Suất ra (%)	Thực nghiệm	Tính toán		Tỉ số	
				$d = 0,35$ mm	$d = 1,16$ mm	$d = 0,35$ mm	$d = 1,16$ mm
1	63,3	4,50	94864	158078	82103	1,67	0,87
2	241,9	7,50	293462	284035	292501	0,97	1,00
3	258,8	0,55	20712	21467	20748	1,04	1,00
4	295,1	18,50	581173	570110	587888	0,98	1,01
5	351,7	35,79	996432	915076	947083	0,92	0,95
6	487,8	0,44	7637	7631	7632	1,00	1,00
7	609,0	44,79	637946	619220	641789	0,97	1,01
8	665,1	1,29	17215	15750	16397	0,91	0,95
9	767,9	4,80	48293	50639	52585	1,05	1,09
10	785,7	0,85	11919	12049	12720	1,01	1,07
11	805,9	1,12	12082	11842	12050	0,98	1,00
12	933,8	3,03	25846	25491	26194	0,99	1,01
13	1120,0	14,80	95008	100718	104071	1,06	1,10
14	1154,9	1,64	10567	10155	10736	0,96	1,02
15	1280,7	1,44	6685	6940	6875	1,04	1,03
16	1377,4	3,92	21571	19388	19710	0,90	0,91
17	1509,0	2,12	8446	9137	8917	1,08	1,06
18	1764,4	15,36	54220	52808	55143	0,97	1,02
19	1847,3	2,40	7187	7187	7187	1,00	1,00
Trung bình $\pm$ Độ lệch chuẩn						$1,03 \pm 0,16$	$1,00 \pm 0,06$



Hình 3. Sự phụ thuộc của tỉ số diện tích các quang đỉnh tính toán so với thực nghiệm vào năng lượng các tia gamma của nguồn ^{238}U

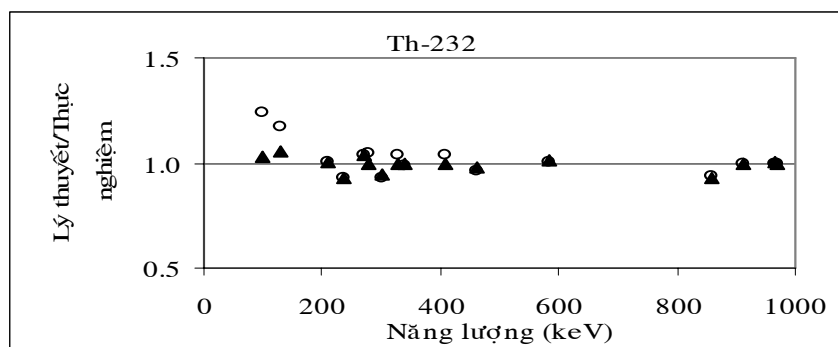
○ Trường hợp $d = 0,35$ mm; ▲ Trường hợp $d = 1,16$ mm

3.3. Nguồn ^{232}Th

Bảng 3 và hình 4 trình bày các kết quả thực nghiệm và tính toán đối với nguồn ^{232}Th . Các giá trị diện tích quang đỉnh tính toán được chuẩn theo thực nghiệm đối với vạch năng lượng 969 keV. Từ bảng 3 và hình 4 thấy rằng tỉ số giữa diện tích các quang đỉnh tính toán và thực nghiệm trong hai trường hợp bề dày lớp germanium bất hoạt $d = 0,35$ mm và $d = 1,16$ mm gần bằng 1 đối với các giá trị năng lượng từ 209,1 keV trở lên. Còn đối với các giá trị năng lượng 99,4 keV và 128,9 keV tỉ số này bằng 1,24 và 1,17 trong trường hợp $d = 0,35$ mm, và giảm xuống bằng 1,03 và 1,06 trong trường hợp $d = 1,16$ mm. Ngoài ra giá trị trung bình trong trường hợp $d = 0,35$ mm bằng $1,02 \pm 0,08$ chuyển thành $0,99 \pm 0,04$ trong trường hợp $d = 1,16$ mm.

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm và tính toán đối với các quang đỉnh của mẫu ^{232}Th .

STT	E (keV)	Suất ra (%)	Thực nghiệm	Tính toán		Tỉ số	
				d = 0,35 mm	d = 1,16 mm	d = 0,35 mm	d = 1,16 mm
1	99,4	1,28	12543	15571	12957	1,24	1,03
2	128,9	2,45	24595	28858	25994	1,17	1,06
3	209,1	3,88	35929	35938	36017	1,00	1,00
4	238,5	43,30	381092	352888	353150	0,93	0,93
5	270,0	3,43	23959	24820	24796	1,04	1,03
6	277,2	2,27	14579	15267	14579	1,05	1,00
7	299,9	3,28	22337	20803	21096	0,93	0,94
8	327,7	2,95	17583	18290	17583	1,04	1,00
9	338,1	11,30	64714	64120	64198	0,99	0,99
10	409,2	1,94	8441	8740	8441	1,04	1,00
11	462,8	4,44	18277	17548	17960	0,96	0,98
12	583,0	30,42	94966	95059	96073	1,00	1,01
13	860,5	4,47	9489	8868	8838	0,93	0,93
14	911,2	26,60	49893	49769	49715	1,00	1,00
15	964,8	5,11	8965	8924	8980	1,00	1,00
16	969,0	16,20	24880	24880	24880	1,00	1,00
Trung bình $\pm$ Độ lệch chuẩn						$1,02 \pm 0,08$	$0,99 \pm 0,04$

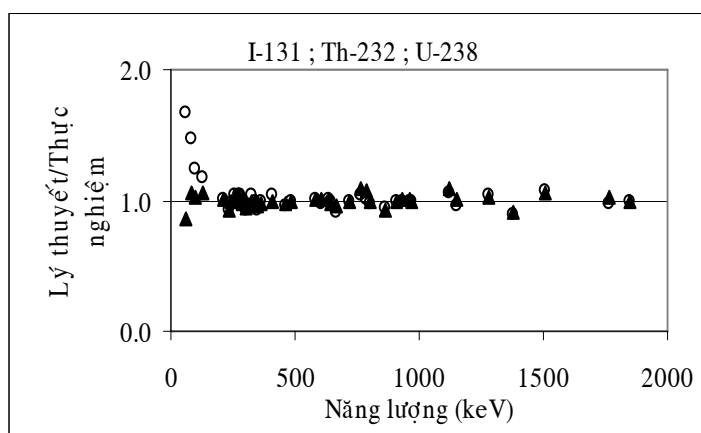


Hình 4. Sự phụ thuộc của tỉ số diện tích các quang đỉnh tính toán so với thực nghiệm vào năng lượng các tia gamma của nguồn ^{232}Th .

○ Trường hợp $d = 0,35$ mm; ▲ Trường hợp $d = 1,16$ mm

3.4. Tổng hợp ba nguồn ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th

Từ việc so sánh giữa tính toán và thực nghiệm đối với ba nguồn phóng xạ ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th thấy rằng kết quả tính toán sẽ phù hợp tốt hơn với thực nghiệm khi tăng bề dày lớp bất hoạt từ 0,35 mm lên 1,16 mm. Hình 5 tổng hợp kết quả về tỉ số giữa các diện tích quang đỉnh tính toán và thực nghiệm đối với 41 vạch năng lượng của ba hạt nhân ^{131}I , ^{238}U và ^{232}Th . Từ hình này thấy rằng đối với trường hợp $d = 0,35$ mm tỉ số này vào khoảng 1,17 – 1,67 trong miền năng lượng dưới 200 keV và dao động quanh giá trị 1 trong miền năng lượng trên 200 keV. Trong lúc đó đối với trường hợp $d = 1,16$ mm tỉ số đó giảm xuống đến 0,87 – 1,06 trong miền năng lượng dưới 200 keV và đạt được $1,00 \pm 0,04$ trong toàn dải năng lượng từ 63,3 keV đến 1847,3 keV. Như vậy ảnh hưởng của bề dày lớp germanium bất hoạt thể hiện chủ yếu đối với các tia gamma có năng lượng dưới 200 keV. Chính miền năng lượng này được sử dụng để kiểm định bề dày lớp germanium bất hoạt hiện nay bằng 1,16 mm như đã xác định trong công trình [12].



Hình 5. Sự phụ thuộc của tỉ số diện tích các quang đỉnh tính toán so với thực nghiệm vào năng lượng các tia gamma của nguồn ^{131}I , ^{232}Th và ^{238}U

○ Trường hợp $d = 0,35$ mm; ▲ Trường hợp $d = 1,16$ mm

4. KẾT LUẬN

Việc đo đạc và tính toán theo chương trình MCNP trong công trình trước đây của chúng tôi đối với nguồn chuẩn dạng điểm ^{60}Co cho thấy bề dày lớp germanium bất hoạt của detector GC1518 tăng từ 0,35 mm năm 1996 đến 1,16 mm hiện nay. Để kiểm chứng giá trị đó, công trình này dẫn ra các phép đo và tính toán đối với nguồn dung dịch ^{131}I , nguồn đất chứa ^{238}U và nguồn đất chứa ^{232}Th đựng trong hộp đựng mẫu dạng Marinelli. Miền năng lượng gamma được khảo sát từ 63,3 keV đến 1847,3 keV và gồm 41 quang đỉnh. Kết quả so sánh giữa tính toán và thực nghiệm đối với cả ba mẫu này đều cho thấy rằng, trong miền năng lượng gamma dưới 200 keV, tỉ số diện tích các quang đỉnh tính toán và thực nghiệm vào khoảng 1,17 – 1,67 với bề dày $d = 0,35$ mm và giảm xuống đến 0,87 – 1,06 với bề dày $d = 1,16$ mm. Trong miền năng lượng lớn hơn 200 keV thì tỉ số này xấp xỉ bằng 1 đối với cả 2 giá trị bề dày 0,35 mm và 1,16 mm. Như vậy giá trị 1,16 mm đối với bề dày lớp germanium bất hoạt không những đúng đối với các giá trị năng lượng 1173 keV và 1332 keV trong trường hợp nguồn điểm ^{60}Co mà cũng đúng trong miền năng lượng rộng từ 63,3 keV đến 1847,3 keV. Sự phù hợp giữa tính toán và thực nghiệm trong miền năng lượng dưới 200 keV là khá lý thú vì trong miền năng lượng thấp này xuất hiện nhiều khác biệt giữa tính toán và thực nghiệm đối với phổ gamma.

SIMULATION OF COMPLEX GAMMA SPECTRA MEASURED IN THE HPGe DETECTOR USING THE MCNP CODE

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

(1) Ho Chi Minh City University of Industry

(2) Center for Nuclear Techniques Ho Chi Minh City

ABSTRACT: *In this paper the MCNP code was used for the simulation of complex gamma spectra measured in the GC1518 HPGe detector at the Center for Nuclear Techniques Ho Chi Minh City. The calculation was performed using the thickness of 1.16 ± 0.07 mm of inactive germanium layer obtained our previous paper. The better agreement between calculation and experiment results was obtained for three radioactive sources ^{131}I , ^{238}U and ^{232}Th when the inactive germanium thickness was changed from 0.35 mm into 1.16 mm. Indeed, in the case of $d = 0.35$ mm the ratios of the calculated and measured photopeak areas are greater than unity in the energy range of below 200 keV and approximately unity in the energy range of above 200 keV. Meanwhile, in the case of $d = 1.16$ mm these ratios are approximately unity in the whole energy range of 63.3 keV to 1847.3 keV.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Garcia-Talavera, H. Neder, 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).
- [2]. I.O.B. Ewa, D. Bodizs, Sz. Czifrus, Zs. Molnar, *Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector*, Applied Radiation and Isotopes, 55, 103-108, (2001).
- [3]. 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).
- [4]. 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).
- [5]. 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).
- [6]. 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).
- [7]. 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).
- [8]. R.G. Helmer, N. Nica, J.C. Hardy, V.E. Iacob, *ecise 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).

- [9]. S. Hurtado, M. Garcia-Leon, R. Garcia-Tenorio, *Monte Carlo simulation of the response of a germanium detector for low-level spectrometry measurements using GEANT4*. Applied Radiation and Isotopes, 61, 139-143, (2004).
- [10]. P. P. Maleka, M. Maucec, *Monte Carlo uncertainty analysis of germanium detector response to γ -rays with energies below 1 MeV*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 538, 631-639, (2005).
- [11]. 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 công nghệ, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, tập 8, số 8, trang 17-25, (2005).
- [12]. Ngô Quang Huy, Đỗ Quang Bình, Võ Xuân Ân, *Nghiên cứu sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt trong detector bán dẫn siêu tinh khiết bằng chương trình MCNP*. Tạp chí phát triển khoa học công nghệ, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, đang in, (2006).
- [13]. Huy, N.Q., Luyen, T.V, *A method to determine ^{238}U activity in environmental soil samples by using 63.3 keV photopeak gamma HPGe spectrometer*. Appl. Radiat. Isot., 61, 1419-1424, (2004).
- [14]. V. Osorio and H. Peraza, *Chart of the nuclides*, Physics section, IAEA, (1995).