

## NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG THỂ TÍCH VÀ HIỆU ỨNG CẢN XẠ CỦA BỀ DÀY LỚP LITHIUM KHUẾCH TÁN TRONG ĐẦU DÒ HPGe LOẠI p

VÕ XUÂN AN

Trường Đại học Công nghiệp Tp. Hồ Chí Minh;  
voxuanan@iuh.edu.vn

**Tóm tắt.** Đầu dò germanium siêu tinh khiết (HPGe), giống như một diode có cấu trúc gồm 3 vùng P, I và N làm việc ở chế độ phân cực nghịch, trong đó vùng I nhạy với các bức xạ ion hóa, đặc biệt là tia gamma và tia X. Trong quá trình hoạt động các nguyên tử lithium của lớp  $n^+$  (lớp lithium khuếch tán  $n^+$ , vùng P) tiếp tục khuếch tán vào sâu bên trong tinh thể làm cho bề dày của lớp này tăng lên đáng kể, do đó, làm giảm hiệu suất ghi của đầu dò. Sự tăng bề dày lớp chết không những làm giảm thể tích vùng nhạy (hiệu ứng thể tích) mà còn làm tăng quãng đường tán xạ của tia gamma đi vào đầu dò (hiệu ứng cản xạ). Kết quả nghiên cứu trên đầu dò HPGe GC1518 cho thấy rằng đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ vào sự giảm hiệu suất ghi của đầu dò lần lượt là 82% và 18%.

**Từ khoá.** Hiệu ứng thể tích, hiệu ứng cản xạ, đầu dò, lớp lithium khuếch tán, hiệu suất, MCNP5

### A STUDY OF THE VOLUME AND RADIATION CONTRAST EFFECTS OF THE DIFFUSED LITHIUM LAYER THICKNESS OF p-TYPE HPGe DETECTORS

**Abstract.** The high purity germanium (HPGe) detector, like a giant semiconductor diode operated under reverse bias, has a P-I-N structure in which the intrinsic (I) region is sensitive to ionizing radiation, particularly X rays and gamma rays. In operation, the continuous diffusion of the lithium atoms inside the germanium crystal leads to that the diffused lithium layer thickness considerably increases and causes that the HPGe detector efficiency decreases. An increase of the diffused lithium layer thickness leads to not only reducing the sensitive volume (called the volume effect) but also increasing the interactive range of gamma rays (called the radiation contrast effect). The results showed that a contribution of the volume and radiation contrast effects on a decrease of the detector efficiency was 82% and 18%, respectively.

**Keywords.** Volume effect, radiation contrast effect, detector, diffused lithium layer, efficiency, MCNP5

## 1 MỞ ĐẦU

Những năm gần đây đã có nhiều công trình nghiên cứu liên quan đến lớp lithium khuếch tán  $n^+$  của đầu dò HPGe như xác định tính đồng nhất của lớp  $n^+$  ở mặt trên đầu dò HPGe [1], đặc trưng tín hiệu do các điện tích tạo thành gần lớp  $n^+$  của đầu dò HPGe loại p [2], ảnh hưởng của bề dày lớp  $n^+$  lên hiệu suất ghi nhận của đầu dò HPGe [3]. Công trình [3] cho thấy rằng có sự khác biệt giữa hiệu suất tính toán bằng phương pháp Monte Carlo và hiệu suất đo đạc thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu trước đây của chúng tôi cho thấy rằng bề dày lớp  $n^+$  tăng theo thời gian hoạt động, từ 0,35 mm năm 1996 lên đến 1,16 mm năm 2005 [4]. Đây là nguyên nhân chính làm giảm hiệu suất ghi nhận của đầu dò. Tuy nhiên, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đóng góp do sự tăng bề dày lớp  $n^+$  chưa được nghiên cứu chi tiết. Thật vậy, khi bề dày lớp  $n^+$  tăng, thể tích vùng nhạy của đầu dò giảm và khả năng ghi nhận tia gamma giảm theo, gọi là hiệu ứng thể tích. Mặt khác, khi bề dày lớp  $n^+$  tăng thì số lượng tia gamma bị hấp thụ ở vùng này trước khi đi vào vùng nhạy của đầu dò tăng theo, gọi là hiệu ứng cản xạ. Do đó, trong công trình này, chúng tôi nghiên cứu sự đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ vào sự giảm hiệu suất ghi nhận của đầu dò do sự tăng bề dày lớp chết dựa vào thực nghiệm đo phổ gamma và tính toán bằng chương trình MCNP5.

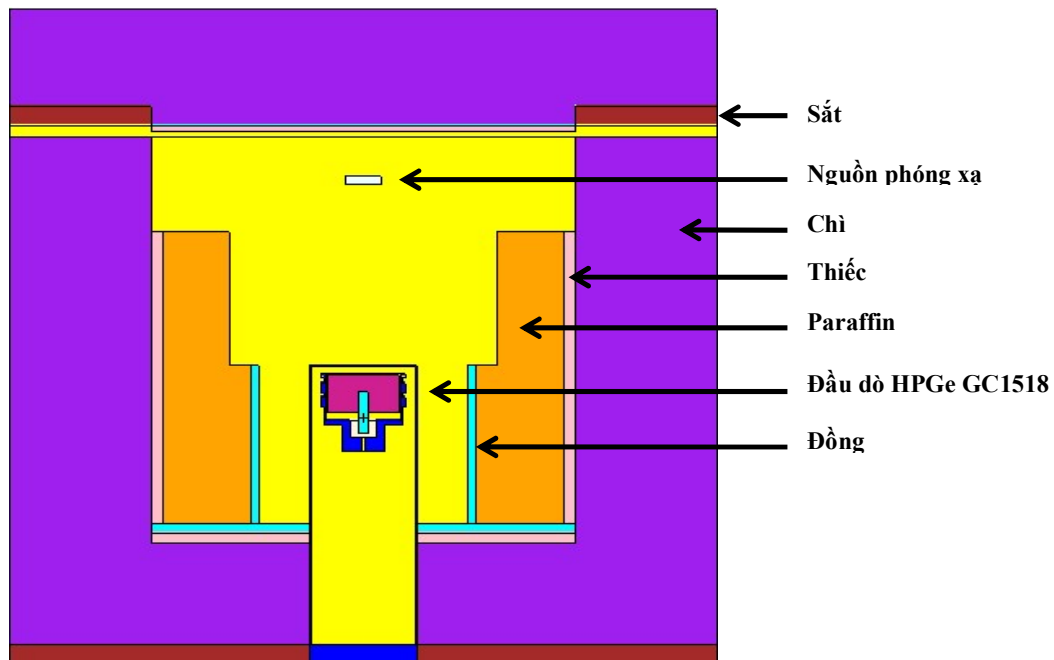
## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Chương trình MCNP5

Cho đến nay đã có nhiều chương trình máy tính đáng tin cậy áp dụng phương pháp Monte Carlo để nghiên cứu các tính chất đặc trưng của hệ phổ kế gamma như EGS [5], GEANT [6], GESPECOR [7], DETEFF [8], MCNP [9] ... Trong công trình này, chương trình máy tính MCNP phiên bản 5 (gọi tắt là MCNP5) được lựa chọn sử dụng để mô phỏng phổ gamma ghi nhận từ hệ phổ kế gamma phòng thấp dùng đầu dò HPGe GC1518. MCNP5 là chương trình máy tính đa mục đích được phát triển bởi nhóm X5, Phòng thí nghiệm Los Alamos, Hoa Kỳ, cho phép mô phỏng tương tác của electron, neutron, photon với vật chất bằng phương pháp Monte Carlo. Một trong những đặc tính ưu việt của MCNP5 là cho phép thiết kế những thí nghiệm mô phỏng mà trong thực tế rất khó hoặc không thể bố trí được. Trong đó, hệ phổ kế gamma được mô hình hoá thông qua việc mô tả các thông số liên quan như: kích thước hình học, thành phần vật liệu, năng lượng tia gamma... trong một input chuẩn của MCNP5 và kết quả phổ gamma mô phỏng được xác định thông qua kết quả phân bố độ cao xung theo năng lượng được truy xuất bằng thẻ F8. Trên cơ sở phổ gamma mô phỏng này, hiệu suất tính toán của đầu dò đối với từng vạch năng lượng tia gamma sẽ được xác định. Trong mô phỏng MCNP5, để đảm bảo tính thống kê số đếm tích lũy với sai số thống kê nhỏ hơn 1% đóng góp trong đỉnh năng lượng toàn phần và cân đối với thời gian mô phỏng có thể chấp nhận được, số sự kiện gamma phát ra từ nguồn được chọn bằng 1.600.000. Chương trình mô phỏng được thực hiện trên máy tính cá nhân với bộ vi xử lý Intel Core i7.

### 2.2 Hệ phổ kế gamma

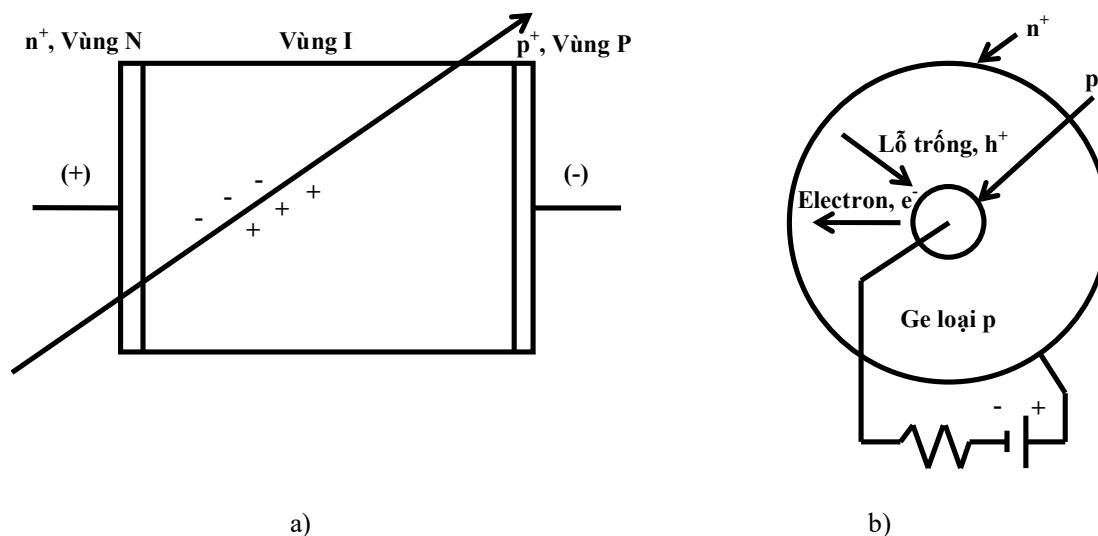
Hệ phổ kế gamma phòng thấp đặt tại Trung tâm Hạt nhân Thành phố Hồ Chí Minh sử dụng đầu dò germanium siêu tinh khiết loại p (HPGe - High Purity Germanium) GC1518 của hãng Mirion Technologies (Canberra), Hoa Kỳ gồm buồng chì, đầu dò, nguồn phóng xạ và hệ thống điện tử. Tuy nhiên, khi tiến hành mô hình hoá hệ phổ kế thì có thể bỏ qua những phần không gian đóng góp không đáng kể vào phổ gamma mô phỏng. Do đó, chỉ cần mô tả cấu trúc hình học và thành phần vật liệu của buồng chì, đầu dò và nguồn phóng xạ như trong Hình 1.



Hình 1. Mặt cắt đứng của buồng chì, đầu dò HPGe GC1518 và nguồn phóng xạ của hệ phổ kế gamma phòng thấp đặt tại Trung tâm Hạt nhân Thành phố Hồ Chí Minh được vẽ bằng chương trình MCNP5.

### 2.3 Đầu dò germanium siêu tinh khiết HPGe GC1518

Đầu dò HPGe GC1518 được chế tạo từ tinh thể Ge dạng hình trụ tròn có độ tinh khiết cao ( $< 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ), giống như một diode có cấu trúc gồm 3 vùng P - I - N làm việc ở chế độ phân cực nghịch như minh họa ở Hình 2a. Vùng I (intrinsic) hay còn gọi là vùng nghèo hoặc vùng nhạy chiếm gần như toàn bộ thể tích của đầu dò, nhạy với bức xạ ion hóa, đặc biệt là tia X và tia gamma. Vùng N (negative) là phần thể tích ở mặt trên và mặt bên của tinh thể Ge được chế tạo bằng cách khuếch tán các nguyên tử lithium (Li) tạo thành lớp  $n^+$  với bề dày 0,35 mm. Vùng P (positive) là phần thể tích ở bề mặt hốc khoan bên trong tinh thể Ge được chế tạo bằng cách cấy các ion boron (B) tạo thành lớp  $p^+$  với bề dày 0,3  $\mu\text{m}$  [10]. Khi tia gamma hoặc tia X xuyên qua đầu dò, các cặp hạt electron ( $e^-$ ) và lỗ trống ( $h^+$ ) được tạo thành trong vùng I sẽ được thu gom về các điện cực và tạo thành xung điện ở ngõ ra của đầu dò được minh họa ở Hình 2b.



Hình 2. Cấu trúc của đầu dò germanium siêu tinh khiết HPGe loại p điện hình giống như một diode gồm 3 vùng P - I - N (a) và minh họa sự thu gom các điện tích  $e^-$ ,  $h^+$  về các điện cực (b).

### 2.4 Bố trí thí nghiệm trong tính toán mô phỏng

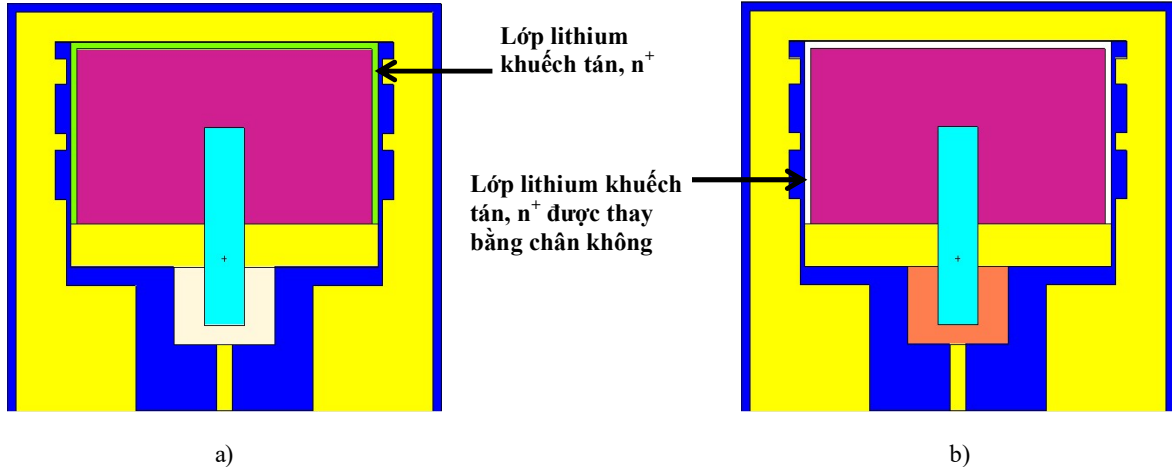
Trong công trình này, việc sử dụng các nguồn phóng xạ và cách bố trí hình học đo tương tự như trong công trình [4], cụ thể như sau: có 4 nguồn phóng xạ với 6 vạch năng lượng gồm  $^{22}\text{Na}$  (511 keV và 1274 keV),  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV),  $^{54}\text{Mn}$  (834 keV) và  $^{60}\text{Co}$  (1173 keV và 1332 keV), đây là các nguồn phóng xạ chuẩn, kích thước nguồn không đáng kể so với khoảng cách nguồn - đầu dò và được xem như nguồn điểm; nguồn phóng xạ được bố trí dọc theo trục của đầu dò với khoảng cách nguồn - đầu dò là 15 cm.

Để nghiên cứu sự đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ vào sự giảm hiệu suất ghi nhận của đầu dò do sự tăng bề dày lớp lithium khuếch tán  $n^+$ , input của chương trình MCNP5 được chuẩn bị với các thông số vật lý được thay đổi gồm bề dày và thành phần vật liệu lớp  $n^+$ . Đối với bề dày lớp  $n^+$ , có hai giá trị được lựa chọn để tính toán MCNP5 gồm 0,35 mm, đây là bề dày lớp lithium khuếch tán khi đầu dò mới đưa vào hoạt động và 1,16 mm, đây là bề dày lớp lithium khuếch tán khi đầu dò đã đưa vào hoạt động sau 9 năm. Đối với thành phần vật liệu lớp  $n^+$ , input của chương trình MCNP5 được chuẩn bị cho 2 trường hợp sau đây:

Trường hợp thứ nhất, input của chương trình MCNP5 được mô tả với thành phần vật liệu của lớp  $n^+$  như thực tế, đó là lớp lithium được khuếch tán vào mặt ngoài tinh thể germanium như trong Hình 3a. Trong trường hợp này đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ xảy ra đồng thời do sự tăng bề dày lớp  $n^+$ , dẫn đến làm thu hẹp thể tích vùng I (vùng nhạy với các tia gamma hoặc tia X) và làm mở rộng vùng N (lớp lithium khuếch tán  $n^+$ ), có nghĩa là làm tăng khả năng cản xạ tia gamma hoặc tia X ở vùng này.

Trường hợp thứ hai, một input của chương trình MCNP5 tương tự như trường hợp thứ nhất được xây

dụng, trong đó chỉ có thành phần vật liệu lớp lithium khuếch tán  $n^+$  được thay thế bằng chân không như trong Hình 3b. Trong trường hợp này thành phần vật liệu lớp  $n^+$  là chân không nên không xảy ra hiệu ứng cản xạ đối với tia gamma hoặc tia X và chỉ xảy ra hiệu ứng thể tích khi thể tích vùng I bị thu hẹp do sự tăng bề dày lớp  $n^+$ .



Hình 3. Mặt cắt đứng của đầu dò HPGe GC1518 với lớp lithium khuếch tán  $n^+$  như thực tế (a) và với lớp lithium khuếch tán  $n^+$  được thay bằng chân không (b) được vẽ bằng chương trình MCNP5.

### 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hiệu suất tính toán bằng chương trình MCNP5 cho 4 trường hợp bề dày lớp lithium khuếch tán 0,35 mm với thành phần vật liệu được mô tả như thực tế và 1,16 mm với thành phần vật liệu được thay thế bằng chân không đối với 6 vạch năng lượng 511, 662, 834, 1173, 1274 và 1332 keV được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Hiệu suất tính toán bằng chương trình MCNP5 và tỷ lệ đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ vào sự giảm hiệu suất ghi nhận của đầu dò do bề dày lớp lithium khuếch tán  $n^+$  tăng theo thời gian hoạt động.

Năng lượng tia gamma (keV)	0,35 mm		1,16 mm		Hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ đồng thời $eff_{0,35-1,16(1)}$	Chỉ có hiệu ứng thể tích		Chỉ có hiệu ứng cản xạ	
	Ge	Chân không	Ge	Chân không		$eff_{0,35-1,16(2)}$	Tỷ lệ đóng góp	$eff_{0,35-1,16(3)}$	Tỷ lệ đóng góp
511	0,00151	0,00154	0,00132	0,00138	0,00020	0,00016	81%	0,00004	19%
662	0,00115	0,00116	0,00101	0,00104	0,00015	0,00012	82%	0,00003	18%
834	0,00090	0,00091	0,00079	0,00081	0,00012	0,00010	82%	0,00002	18%
1173	0,00068	0,00069	0,00058	0,00061	0,00010	0,00008	84%	0,00002	16%
1274	0,00061	0,00062	0,00053	0,00055	0,00008	0,00006	81%	0,00002	19%
1332	0,00058	0,00059	0,00051	0,00052	0,00008	0,00007	84%	0,00001	16%
Trung bình							82%		18%
Độ lệch chuẩn							2%		2%

Trong đó, ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ được xác định theo độ giảm hiệu suất khi bề dày lớp lithium khuếch tán tăng từ 0,35 mm lên 1,16 mm với thành phần vật liệu được mô tả như thực tế và được tính theo công thức (1):

$$\text{eff}_{0,35-1,16(1)} = \text{eff}_{0,35; \text{Ge}} - \text{eff}_{1,16; \text{Ge}} \quad (1)$$

Ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích được xác định theo độ giảm hiệu suất khi bề dày lớp lithium khuếch tán tăng từ 0,35 mm lên 1,16 mm với thành phần vật liệu được thay thế bằng chân không và được tính theo công thức (2) sau đây:

$$\text{eff}_{0,35-1,16(2)} = \text{eff}_{0,35; \text{Chân không}} - \text{eff}_{1,16; \text{Chân không}} \quad (2)$$

Khi đó ảnh hưởng của hiệu ứng cản xạ được xác định bởi công thức (3):

$$\text{eff}_{0,35-1,16(3)} = \text{eff}_{0,35-1,16(1)} - \text{eff}_{0,35-1,16(2)} \quad (3)$$

Chẳng hạn, tại vạch năng lượng 662 keV, độ giảm hiệu suất do bề dày lớp lithium khuếch tán  $n^+$  với thành phần vật liệu được mô tả như thực tế tăng từ 0,35 mm lên 1,16 mm là 0,00015, khi đó ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ xảy ra đồng thời; độ giảm hiệu suất do bề dày lớp lithium khuếch tán  $n^+$  với thành phần vật liệu được thay thế bằng chân không tăng từ 0,35 mm lên 1,16 mm là 0,00012 tương ứng với tỷ lệ đóng góp là 82%, khi đó chỉ có ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích xảy ra; độ giảm hiệu suất khi chỉ có ảnh hưởng của hiệu ứng cản xạ xảy ra là 0,00003 tương ứng với tỷ lệ đóng góp là 18%. Tính trung bình đối với 6 vạch năng lượng đã khảo sát ở trên, tỷ lệ đóng góp ảnh hưởng do hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ lần lượt là 82% và 18% được trình bày ở dòng thứ 9 Bảng 1. Để thấy rằng, mức độ ảnh hưởng do hiệu ứng thể tích lớn gấp 4,5 lần so với hiệu ứng cản xạ.

#### 4 KẾT LUẬN

Việc sử dụng chương trình MCNP5 đã cho phép thiết kế thí nghiệm thay thế thành phần vật liệu lớp lithium khuếch tán  $n^+$  bằng chân không để nghiên cứu sự đóng góp ảnh hưởng của hiệu ứng thể tích và hiệu ứng cản xạ do sự tăng bề dày lớp  $n^+$ , một công việc không thể thực hiện trong thực tế thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu trên đầu dò HPGe GC1518 đã chỉ ra rằng, khi tăng bề dày lớp  $n^+$ , sự đóng góp ảnh hưởng vào sự giảm hiệu suất của hiệu ứng thể tích (82%) lớn hơn hiệu ứng cản xạ (18%). Điều này chứng tỏ hiệu suất ghi nhận của đầu dò phụ thuộc mạnh vào thể tích của nó.

#### PHỤ LỤC

##### Một input chuẩn của MCNP5:

Problem - A study of the volume and radiation contrast effects of the diffused lithium layer thickness of p-type HPGe detectors

c Cell cards

- 1 6 -8.94 (-1 -23 21):(-1 -21 90) imp:p,e=1 \$ loi Cu dan tin hieu
- 2 1 -5.35 (-55 -64 22)#1#34 imp:p=1 imp:e=0 \$ cell detector
- 3 3 -0.00129 (1 -2 -22 21)#1#(-96 -22 21) imp:p,e=1
- 4 2 -2.6989 (2 -87 -83 82):(2 -3 -84 83):(2 -87 -85 84) &  
:(2 -3 -86 85):(2 -87 -24 86):(2 -3 -82 21):((92 -3 -21 20)#(-95 -21 20)) &  
:(92 -93 -20 89):(91 -93 -89 88) imp:p,e=1
- 5 3 -0.00129 (-4 -25 57):(87 -4 -57 86):(3 -4 -86 85):(87 -4 -85 84) &  
:(3 -4 -84 83):(87 -4 -83 82):(3 -4 -82 20):(-4 -20 16)#(-93 -20 88)#(-95 -20 90) imp:p,e=1
- 6 2 -2.6989 (-5 -26 25):(4 -5 -25 16):(-5 -16 15) imp:p,e=1
- 11 3 -0.00129((-13 -31 30):(-11 -30 26):(5 -9 -26 19))#45#46 imp:p,e=1
- 12 6 -8.94 9 -10 -26 19 imp:p,e=1
- 13 7 -0.88 (11 -12 -30 26):(10 -12 -26 19) imp:p,e=1
- 14 8 -7.28 12 -13 -30 19 imp:p,e=1
- 15 9 -11.34 (13 -14 -31 17):(5 -14 -17 16) imp:p,e=1
- 16 3 -0.00129 (-13 -32 31):(13 -14 -34 31) imp:p,e=1
- 17 8 -7.28 -13 -33 32 imp:p,e=1
- 18 6 -8.94 -13 -34 33 imp:p,e=1
- 19 10 -7.86 13 -14 -35 34 imp:p,e=1
- 20 9 -11.34 (-14 -36 35):(-13 -35 34) imp:p,e=1

21 10 -7.86 5 -14 -16 15 imp:p,e=1  
 22 8 -7.28 5 -13 -18 17 imp:p,e=1  
 23 6 -8.94 5 -13 -19 18 imp:p,e=1  
 24 0 14:36:-15 imp:p,e=0  
 34 15 -2.31 (1 -54 -23 22):(-54 -56 23) imp:p,e=1 \$ dien cuc cay ion B  
**35 17 -5.05 (-55 -24 64):(55 -2 -24 22) imp:p,e=1 \$ dien cuc khuech tan Li**  
 36 18 -1.435 -87 -81 24 imp:p,e=1 \$ cua so IR mylar  
 45 11 -0.0899 -76 -79 78 imp:p,e=1 \$ nguon Cs  
 46 13 -1.15 (-77 -80 78)#45 imp:p,e=1 \$ holder epoxy  
 47 20 -1.11 -87 -57 81 imp:p,e=1 \$ cua so IR kapton  
 48 21 -2.2 (1 -92 -21 90):(-92 -90 89) imp:p,e=1 \$ teflon  
 49 3 -0.00129 -91 -89 88 imp:p,e=1 \$ ranh khong khi cua coc Al  
 50 3 -0.00129 -94 -22 90 imp:p,e=1 \$ ranh khong khi cua vo boc PE  
 51 4 -0.92 (94 -96 -22 21):(94 -95 -21 20):(94 -95 -20 90) imp:p,e=1 \$ vo boc PE

c Surface cards

1 cz 0.35  
 2 cz 2.7  
 3 cz 2.776  
 4 cz 3.66  
 5 cz 3.81  
 9 cz 7.35  
 10 cz 7.95  
 11 cz 9.45  
 12 cz 14.2  
 13 cz 15.0  
 14 cz 25.0  
 15 pz 0.0  
 16 pz 1.6  
 17 pz 10.0  
 18 pz 10.8  
 19 pz 11.6  
 20 pz 19.742  
 21 pz 20.062  
 22 pz 20.815  
 23 pz 22.515  
 24 pz 24.015  
 25 pz 24.55  
 26 pz 24.7  
 30 pz 35.8  
 31 pz 43.6  
 32 pz 44.1  
 33 pz 44.5  
 34 pz 44.6  
 35 pz 46.2  
 36 pz 54.2  
 54 cz 0.3503 \$ dien cuc khuech tan Li  
 55 cz 2.584 \$ dien cuc khuech tan Li  
 56 pz 22.5153 \$ dien cuc loi B  
 57 pz 24.026 \$ cua so IR  
 64 pz 23.899 \$ dien cuc cua so Li  
 76 cz 0.05 \$ hinh hoc nguon Cs  
 77 cz 1.27 \$ hinh hoc nguon Cs

78 pz 39.7 \$ hình học nguồn Cs  
 79 pz 39.8 \$ hình học nguồn Cs  
 80 pz 40.34 \$ hình học nguồn Cs  
 81 pz 24.016 \$ split mylar and kapton  
 82 pz 21.255 \$ split the detector holder  
 83 pz 22.115 \$ split the detector holder  
 84 pz 22.415 \$ split the detector holder  
 85 pz 23.275 \$ split the detector holder  
 86 pz 23.715 \$ split the detector holder  
 87 cz 2.97 \$ split the detector holder  
 88 pz 17.536 \$ split the detector holder  
 89 pz 18.696 \$ split the detector holder  
 90 pz 19.042 \$ split the detector holder  
 91 cz 0.13 \$ split the detector holder  
 92 cz 0.88 \$ split the detector holder  
 93 cz 1.546 \$ split the detector holder  
 94 c/z 0 -2.2 0.1 \$ day dan in/out  
 95 c/z 0 -2.2 0.2 \$ day dan in/out  
 96 c/z 0 -2.2 0.49 \$ day dan in/out

c Data cards

mode p

m1 32000 -1.0 \$ Ge  
 m2 13000 -1.0 \$ Al  
 m3 7000 -0.755 8000 -0.232 18000 -0.013 \$ Atmosphere  
 m4 1000 -0.14372 6000 -0.85628 \$ Polyethylene  
 m6 29000 -1.0 \$ Cu  
 m7 1000 -0.1549 6000 -0.8451 \$ Paraffin C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>  
 m8 50000 -1.0 \$ Sn  
 m9 82000 -1.0 \$ Pb  
 m10 26000 -1.0 \$ Fe  
 m11 1000 -1.0 \$ Cs  
 m13 1000 -0.06 6000 -0.721 8000 -0.219 \$ Epoxy  
 m15 5000 -1.0 \$ B  
**m17 32000 -0.9999 3000 -0.0001 \$ Ge Li - diện tích khuếch tán Li**  
 m18 1000 -0.053 6000 -0.526 8000 -0.421 \$ Mylar C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>  
 m20 1000 -0.028 6000 -0.720 7000 -0.077 8000 -0.175 \$ Kapton C<sub>22</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>  
 m21 6000 -0.24 9000 -0.76 \$ Teflon (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>  
 sdef cel=45 pos=0 0 0 axs=0 0 1 ext=d1 rad=d2 erg=0.66166 par=2 wgt=10  
 ft8 geb 0.00071 0.00075 0.46493  
 si1 h 39.7 39.8  
 sp1 d -21 0  
 si2 h 0.0 0.05  
 sp2 -21 1  
 f8:p 2  
 e8 0 .0001 .005471 8190i 1.942341  
 phys:p \$ produce bremsstrahlung radiations  
 phys:e  
 cut:p 2j 0 0 \$ because of taking a tally of pulse height distributions  
 cut:e  
 nps 1600000  
 ctme 120

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mikael Hult et al. (1981), Determination of homogeneity of the top surface deadlayer in an old HPGe detector, *Applied Radiation and Isotopes*, 147 182-188.
- [2] E. Aguayo et al. (2013), Characteristics of signals originating near the lithium-diffused n+ contact of high purity germanium p-type point contact detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 701 176-185.
- [3] J. Ródenas et al. (2003), 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.
- [4] N. Q. Huy et al. (2003), Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 573 384-388.
- [5] Canada National Research Council (2018), EGSnrc: software tool to model radiation transport, [www.nrc-cnrc.gc.ca](http://www.nrc-cnrc.gc.ca).
- [6] J. Allison et al. (2016), Geant4 toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 835 186-225.
- [7] O. Sima, D. Arnold, C. Dovelte (2001), GESPECOR: A versatile tool in gamma-ray spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 248 359-364.
- [8] N. Cornejo Diaz, M. Jurad Vargas (2008), DETEFF: An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 586 204-210.
- [9] X-5 Monte Carlo Team (2003), MCNP - A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, [mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-03-1987.pdf](http://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf).
- [10] Mirion Technologies (Canberra), Inc. (2019), Germanium Detectors - User's Manual, [www.mirion.com/products/germanium-detectors](http://www.mirion.com/products/germanium-detectors).

*Ngày nhận bài: 08/11/2019*

*Ngày chấp nhận đăng: 07/01/2020*