

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ KHẢ NĂNG GIẢM PHÔNG TRÊN HỆ THỐNG PHỔ KẾ GAMMA TRỪNG PHÙNG SỬ DỤNG ĐẦU DÒ BÁN DẪN SIÊU TINH KHIẾT

Đinh Sỹ Hiền

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 21 tháng 06 năm 2011, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 15 tháng 03 năm 2012)

TÓM TẮT: Hệ thống phổ kế gamma trừng phùng dùng đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe được sử dụng trong nghiên cứu môi trường, nghiên cứu phản ứng hạt nhân (n, γ), ($n, 2\gamma$) vì nền phông Compton trong phổ gamma thu được của loại phổ kế này rất thấp. Trong công trình này, những hệ phổ kế gamma trừng phùng như: sử dụng khối trừng phùng thông thường, sử dụng khối biến đổi thời gian-biên độ, trừng phùng tổng được tổng quan và những kết quả thực nghiệm thu được trên các hệ thống phổ kế gamma trừng phùng sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe được trình bày. Đặc biệt, khi lợi dụng những ưu điểm của phần cứng và phần mềm của phổ kế gamma trừng phùng tổng cho nghiên cứu phản ứng hạt nhân (n, γ), ($n, 2\gamma$), chúng tôi đã tạo nên phổ kế gamma với phông rất thấp.

Từ khóa: phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe, phổ kế gamma trừng phùng sử dụng đầu dò HPGe, phổ kế trừng phùng tổng.

MỞ ĐẦU

Phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết Germani (HPGe) được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực ứng dụng kỹ thuật hạt nhân vì khả năng phân giải 1,8 keV tại đỉnh 1332,5 keV của nguồn phóng xạ Co-60, hiệu suất ghi cao. Đặc điểm đáng lưu ý trong các phổ gamma thu được bao gồm các đỉnh quang và một nền Compton kèm theo cho nên đỉnh quang càng nhiều thì nền Compton càng cao.

Về mặt công nghệ, các hãng chế tạo đầu dò bán dẫn như Canberra, ORTEC đã phát triển các loại đầu dò bán dẫn Germani siêu tinh khiết với khả năng phân giải cao, hiệu suất ghi cao và tăng tỷ số đỉnh trên Compton (peak-Compton ratio, P/C) nhằm nâng cao đặc trưng

của phổ kế gamma. Những phần mềm cho thu nhận và xử lý phổ gamma như Gernie-2000 đã đạt tới trình độ chuyên nghiệp cao và thân thiện với người sử dụng [1].

Nhiều cố gắng để tăng tỷ số P/C của hệ thống phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe (hay giảm nền phông Compton) đã được thực hiện về mặt phương pháp bao gồm: 1) phương pháp đối trừng nghĩa là tín hiệu Compton được sử dụng để cấm thu phổ; 2) phương pháp trừng phùng nghĩa là tín hiệu đỉnh quang được sử dụng để cho phép thu phổ [2, 3].

Phương pháp trừng phùng tổng được Hoogenboom đề xuất lần đầu tiên vào năm 1958 sử dụng hai đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) [4]

cho phép đo phổ gamma nổi tảng. Hệ thống cộng biên độ xung được thực hiện bằng mạch cộng tương tự. Xung tổng lối ra được dẫn tới bộ phân biệt một kênh và tín hiệu lối ra được chọn của bộ phân biệt mở cổng máy phân tích biên độ nhiều kênh cho phép ghi phổ trùng phùng. Sau này, người ta phát triển phương pháp trùng phùng tổng cho nghiên cứu phân ứng hạt nhân (n, γ) [5] và ($n, 2\gamma$) cho hệ thống phổ kế trùng phùng tổng sử dụng đầu dò bán dẫn [6, 7].

Trong công trình này những hệ thống phổ kế gamma trùng phùng sử dụng đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết Germani như: trùng phùng thường; trùng phùng sử dụng bộ biến đổi thời gian thành biên độ (TAC); trùng phùng tổng được tổng quan và những kết quả thực nghiệm thu được từ những hệ thống kể trên được mô tả. Mục đích chính mà chúng tôi hướng tới trong công trình này là sử dụng kỹ thuật trùng phùng tổng dùng đầu dò bán dẫn HPGe hiện đại với khả năng phân giải cao, hiệu suất ghi cao, để giảm nền phóng Compton của phổ kế gamma. Kết quả đo thực nghiệm sử dụng kỹ thuật trùng phùng tổng để giảm phóng là rất hiệu quả so với phương pháp trùng phùng thông thường và đối trùng.

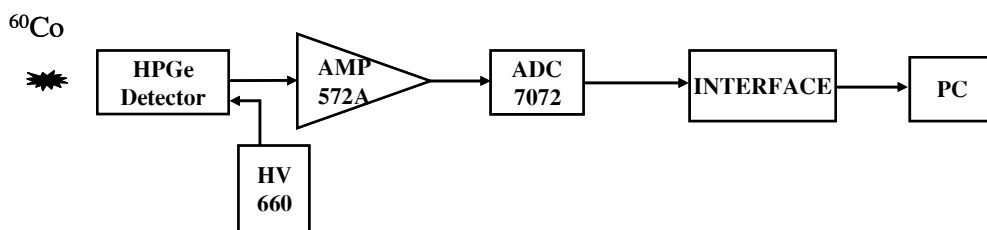
VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Trước khi khảo sát các hệ thống gamma trùng phùng, sử dụng TAC và trùng phùng tổng, ta tổng quan ngắn gọn về hệ thống phổ kế gamma sử dụng đầu dò HPGe.

Hệ thống phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn Ge siêu tinh khiết

Phổ kế gamma dùng đầu dò bán dẫn HPGe được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu vật lý hạt nhân thực nghiệm, nghiên cứu môi trường, trong phân tích kích hoạt neutron ... vì có khả năng phân giải cao, hiệu suất ghi cao (hiện nay có thể đạt tới 100% hoặc lớn hơn) [3]. Sơ đồ khối của hệ thống phổ kế gamma được trình bày trên Hình 1. Phổ kế bao gồm đầu dò bán dẫn HPGe, cao thế nuôi đầu dò (high voltage, HV), khuếch đại phổ kế (Amp), bộ biến đổi tương tự thành số (ADC), máy phân tích đa kênh ghép máy tính (MCA-PC). Bức xạ gamma từ nguồn phóng xạ tương tác với đầu dò HPGe theo ba cơ chế tương tác cơ bản: Compton, quang điện và tạo cặp. Các hiệu ứng kể trên là mạnh hay yếu với vật chất của đầu dò tùy vào năng lượng của bức xạ gamma (E_γ). Về cơ bản, kết quả tương tác của bức xạ gamma với đầu dò bán dẫn cho ta phổ năng lượng gamma bao gồm các đỉnh quang, nền Compton, đỉnh thoát đơn, đỉnh thoát kép (nếu $E_\gamma > 1,022$ MeV, hiệu ứng tạo cặp). Tín hiệu từ lối ra của đầu dò bán dẫn được hình thành và khuếch đại nhờ bộ khuếch đại phổ kế (Amp), được biến đổi thành mã số nhờ bộ biến đổi tương tự thành số (ADC) và được lưu vào bộ nhớ của máy tính nhờ bộ giao diện (Interface). Kết quả ta nhận được phổ gamma biểu diễn phân bố cường độ của bức xạ gamma theo năng lượng. Hình 2 trình bày phổ gamma của nguồn phóng xạ Co-60 nhận được từ phổ kế gamma bán dẫn HPGe. Phổ bao gồm hai đỉnh quang ($E_{\gamma 1} = 1173,2$ keV), ($E_{\gamma 2} = 1332,5$ keV) và nền Compton. Tỷ số đỉnh trên Compton (P/C) nhận được bằng cách chia số đếm độ cao đỉnh 1332,5 keV (Co-

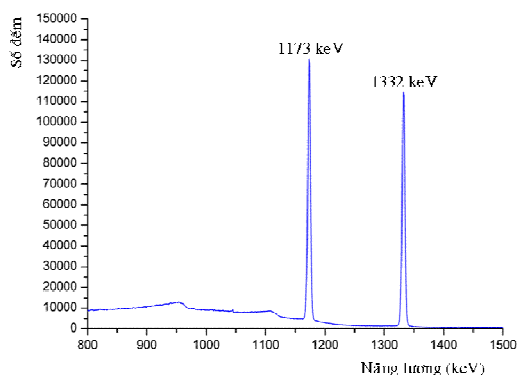
60) cho số đếm trung bình của nền Compton 1096 keV.
trong khoảng năng lượng từ 1040 keV đến



Hình 1. Sơ đồ khối đơn giản của phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe.

Với sự phát triển của công nghệ bán dẫn, những đầu dò HPGe có khả năng phân giải đạt được là 1,8 keV tại 1332,5 keV, tùy vào hiệu

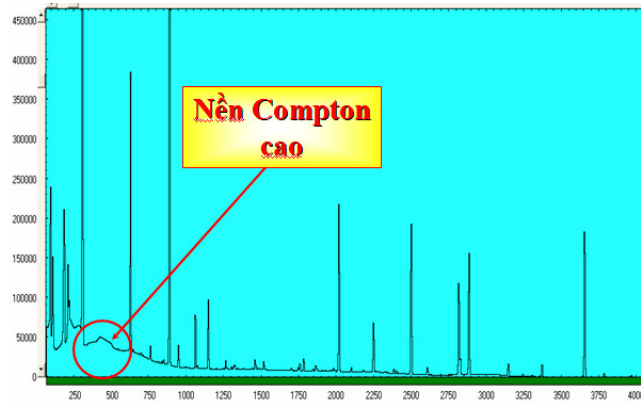
suất của đầu dò từ 10 đến 100% mà tỷ số P/C có thể nhận được từ 40 đến 80 [3].



Hình 2. Phổ gamma nhận được sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn phóng xạ chuẩn Co-60.

Trên thực tế phổ gamma là khá phức tạp khi số đỉnh quang trong phổ tăng, nền Compton sẽ tăng theo hiệu ứng cộng và do đó những đỉnh quang nằm trên nền Compton này sẽ bị méo, nhiều đỉnh quang có cường độ thấp có thể bị

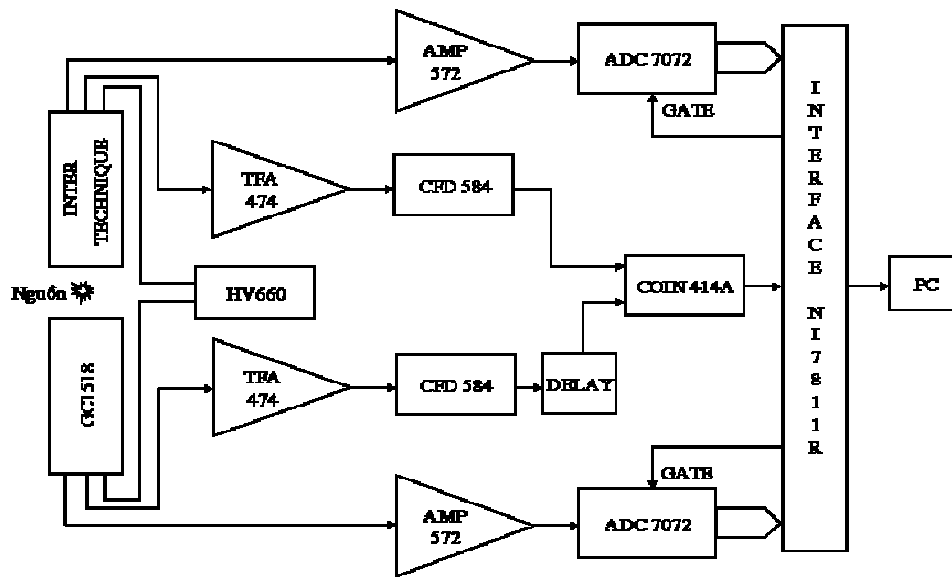
che khuất (Hình 3). Để giải quyết vấn đề này người ta phát triển các phần mềm chuyên dụng để thu nhận và xử lý phổ cho hệ thống này như Gernie 2000 [1], song vấn đề nền Compton thì vẫn chưa được giải quyết một cách căn bản.



Hình 3. Phổ gamma nhận được sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn phóng xạ chuẩn Eu-152

Hệ thống phổ kế trùng phù hợp gamma thông thường

Để giảm phong Compton người ta sử dụng hệ thống phổ kế trùng phù hợp được trình bày trên Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối của hệ thống phổ kế trùng phù hợp gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe

Hệ thống bao gồm: hai đầu dò bán dẫn HPGe thường là loại nằm ngang được đặt đối diện nhau, nguồn nuôi cao thế (HV 660), hai kênh phổ biên độ hoàn toàn giống nhau (khuếch đại phổ kế AMP 572, ADC 7072), hai kênh khuếch

đại, hình thành xung và phân biệt nhanh (TFA-474, CFD-584), làm chậm ns, khối trùng phù hợp (COINC- 414A), mạch giao diện nối với PC. Mạch khuếch đại phổ kế sẽ khuếch đại xung ra từ tiền khuếch đại nhạy điện tích của đầu dò

HPGe, hình thành xung để nâng cao tỷ số tín hiệu trên tạp âm (S/N). Mạch khuếch đại và phân biệt nhanh hình thành các xung đánh dấu chính xác sự kiện về thời gian trong dải ns [3].

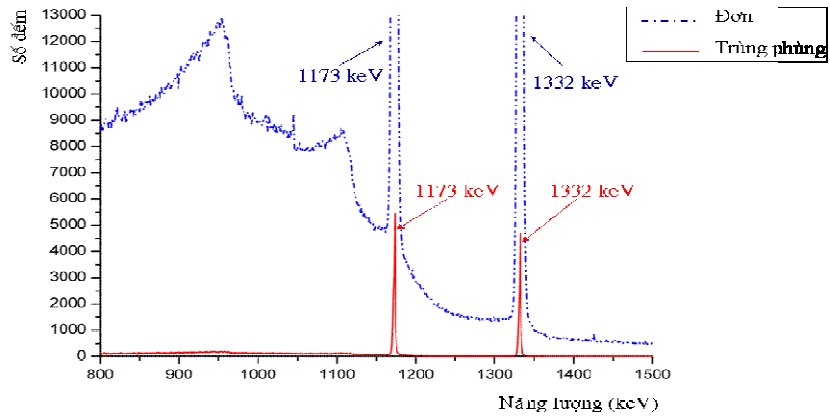
Tín hiệu từ lối ra của tiền khuếch đại nhạy điện tích nối với hai đầu dò bán dẫn được khuếch đại và hình thành, được biến đổi thành số nhờ ADC và được lưu vào bộ nhớ của giao diện. Từ lối ra thời gian của tiền khuếch đại, tín hiệu được nối với bộ khuếch đại nhanh, hình thành bằng bộ phân biệt nhanh CFD, đưa tới lối vào trùng phùng nhanh 414A. Tín hiệu lối ra trùng phùng nhanh sẽ điều khiển giao diện cho phép ADC biến đổi tín hiệu và chỉ có tín hiệu này được ghi vào bộ nhớ.

Để kiểm tra tỷ số đỉnh trên Compton (P/C) hay khả năng giảm phông của hệ thống phổ kế gamma này chúng tôi dùng quy trình kiểm tra chuẩn mà nhiều phòng thí nghiệm trên thế giới sử dụng [3], đó là dùng nguồn chuẩn Co-60, tiến hành thu phổ gamma không trùng phùng và có trùng phùng trong khoảng thời gian xác định. Tỷ số P/C là tỷ số của số đếm tại đỉnh quang (1332,5 keV) và số đếm trung bình của nền Compton trong khoảng năng lượng từ 1040 keV đến 1096 keV. Kết thúc quá trình đo ta thu được phổ gamma trùng phùng như Hình 5. Nền Compton của phổ gamma trong Hình 5 bị giảm đáng kể và phẳng hơn nhiều so với Hình 2. Tỷ

số P/C được làm tốt lên cỡ từ 3 đến 4 lần. Ta nhận thấy trong cùng thời gian đo với phổ trên Hình 2, số đếm tại đỉnh quang trong Hình 5 là khá thấp.

Thời gian phân giải trùng phùng tối ưu cũng được khảo sát trong thí nghiệm này. Tỷ số P/C tối ưu khi thời gian phân giải là 60 ns và thời gian làm chậm trong kênh nhanh là 40 ns. Nguyên nhân có sự phụ thuộc của tỷ số P/C vào thời gian phân giải trùng phùng là do số đếm trùng phùng ngẫu nhiên tăng khi tăng thời gian phân giải trùng phùng. Nếu ta gọi N_{acc} là số đếm trùng phùng ngẫu nhiên, N_1 và N_2 là số đếm trong hai kênh nhanh tương ứng, thì quan hệ giữa số đếm trùng phùng ngẫu nhiên với N_1 , N_2 và thời gian phân giải trùng phùng τ được cho bằng: $N_{acc} = 2 N_1 N_2 \tau$ (1)

Theo công thức (1), thời gian phân giải trùng phùng τ càng nhỏ thì số đếm trùng phùng ngẫu nhiên càng nhỏ và phổ trùng phùng càng lý tưởng, song trong thực tế sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe hiệu suất cao (dung tích đầu dò lớn) tồn tại hiệu ứng thời gian tụ điện tích cho nên mật tăng xung là rất khác nhau dẫn tới phải chọn τ tối ưu để đảm bảo hiệu suất trùng phùng cho từng hệ thống. Trong trường hợp của thí nghiệm này, chúng tôi sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe có hiệu suất ghi 15% và thời gian phân giải tối ưu là 60 ns.



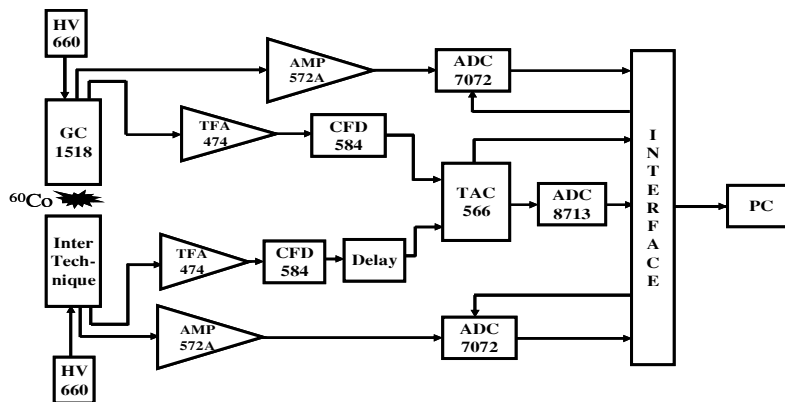
Hình 5. So sánh phổ gamma thông thường (đường màu xanh) và phổ gamma trùng phùng (đường màu đỏ) sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn Co-60

So sánh trực tiếp khả năng giảm nền Compton của phổ kế gamma trùng phùng và phổ kế gamma thông thường được trình bày trên Hình 5.

Hệ thống phổ kế gamma trùng phùng sử dụng biến đổi thời gian biên độ (TAC)

Để giảm phong Compton người ta sử dụng hệ thống phổ kế gamma trùng phùng sử dụng TAC hiện đại hơn được trình bày trên Hình 6.

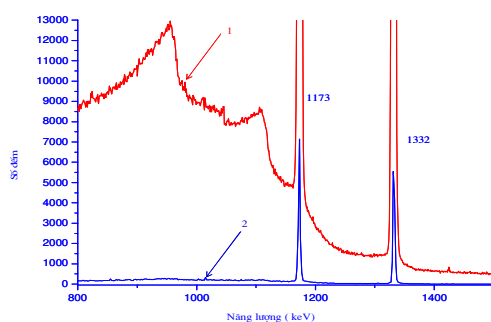
Hệ thống bao gồm: hai đầu dò bán dẫn HPGe thường là loại nằm ngang được đặt đối diện nhau, nguồn nuôi cao thế (HV 660), hai kênh phổ biên độ hoàn toàn giống nhau (khuếch đại phổ kế AMP 572, ADC 7072), hai kênh khuếch đại và hình thành xung nhanh (TFA-474, CFD-584), làm chậm ns, khối biến đổi thời gian thành biên độ (TAC, 566), mạch giao diện nối với PC.



Hình 6. Sơ đồ khối của hệ thống phổ kế trùng phùng gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với TAC

Tín hiệu từ lối ra của tiền khuếch đại nhạy điện tích nối với hai đầu dò bán dẫn được khuếch đại và hình thành, biến đổi thành số nhờ ADC và lưu vào bộ nhớ của giao diện. Từ lối ra thời gian của tiền khuếch đại, tín hiệu được nối với hai bộ khuếch đại nhanh, hình thành bằng hai bộ phân biệt nhanh CFD, một lối ra của CFD được đưa tới lối vào “start” và lối ra khác qua làm chậm được đưa tới lối vào “stop” của TAC 566. Tín hiệu lối ra SCA của

TAC điều khiển giao diện cho phép ADC biến đổi tín hiệu và chỉ có tín hiệu này được ghi vào bộ nhớ. Kết thúc quá trình đo ta thu được phổ gamma trùng phùng như Hình 7 (đường màu xanh 2). Nền Compton của phổ gamma trong Hình 7 bị giảm đáng kể và phẳng hơn nhiều. Tỷ số P/C được làm tốt lên cỡ từ 3 đến 5 lần. Ta nhận thấy cùng thời gian đo với phổ trên Hình 2, số đếm tại đỉnh quang trong Hình 7 là khá thấp.



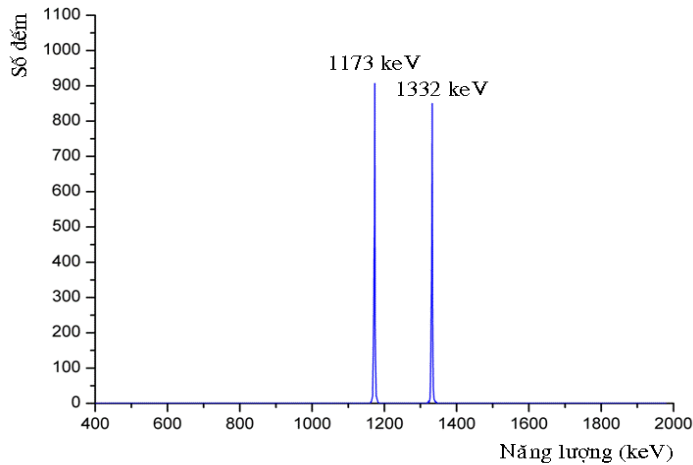
Hình 7. So sánh phổ gamma thông thường (đường màu đỏ) và phổ trùng phùng gamma sử dụng TAC (đường màu xanh) sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn Co-60: 1) phổ gamma bình thường, 2) phổ gamma trùng phùng

Hệ thống phổ kế gamma trùng phùng tổng

Phương pháp trùng phùng tổng được Hoogenboom đề xuất vào năm 1958 sử dụng hai đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) [4]. Hệ cộng biên độ xung được thực hiện bằng mạch cộng tương tự. Dựa vào xung lối ra của mạch cộng tương tự và phân tích biên độ để chọn xung trùng phùng.

Sau này, người ta phát triển phương pháp trùng phùng tổng cho hệ thống phổ kế trùng phùng bán dẫn bằng sử dụng phần mềm để

chọn các xung trùng phùng tổng trong nghiên cứu phản ứng chiếm bức xạ (n, γ) [5] và $(n, 2\gamma)$ [6, 7]. Nguyên tắc hoạt động của kỹ thuật này có thể được trình bày như sau. Nếu có hai sự kiện trùng phùng, thí dụ trong trường hợp nguồn phóng xạ Co-60 với năng lượng $E_{\gamma 1} = 1173,2 \text{ keV}$ và $E_{\gamma 2} = 1332,5 \text{ keV}$ thì đỉnh tổng sẽ là $E_{\gamma} = 2505,7 \text{ keV}$, giao diện sẽ cung cấp tín hiệu cho phép ADC biến đổi, kết thúc biến đổi dữ liệu số được ghi vào ổ cứng.



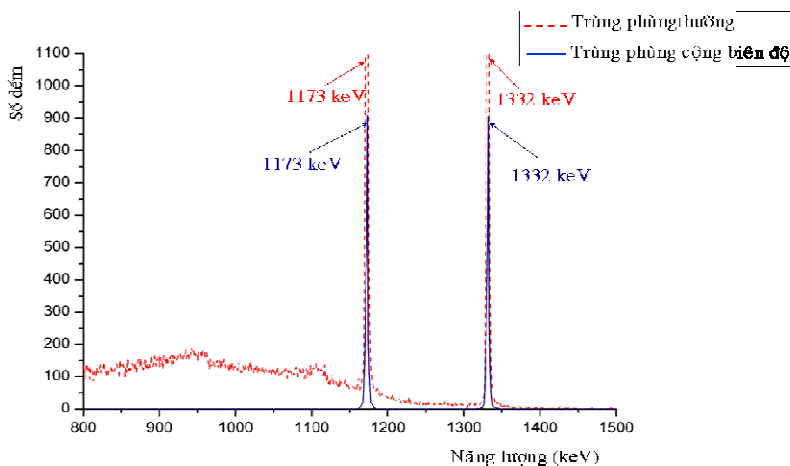
Hình 8. Phổ gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn phóng xạ Co-60 sau khi sử dụng phương pháp trùng phùng tổng

Đầu tiên ta sử dụng hệ thống được trình bày trong hình 7 để thu phổ năng lượng gamma và ghi vào một tập tin nhất định. Sử dụng chương trình xử lý phổ chuyên dụng như OriginPro 7.5 nạp phổ nhận được phổ gamma gốc, tìm đỉnh tổng và xác lập cửa sổ năng lượng của đỉnh tổng. Cuối cùng lọc sự kiện trùng phùng có tổng nằm trong cửa sổ kể trên và trên cơ sở đó vẽ phổ năng lượng gamma trùng phùng. Kết quả phổ gamma trùng phùng tổng sau khi xử lý được trình bày trong Hình 8.

Ta nhận thấy phổ gamma của nguồn Co-60 sau khi sử dụng phương pháp trùng phùng tổng chỉ còn hai đỉnh năng lượng 1173,2 keV và

1332,5 keV, nền Compton hoàn toàn biến mất. Tỷ số P/C đạt được trong thí nghiệm này là 850. Tỷ số P/C của phổ gamma trùng phùng thực tế là hữu hạn vì đỉnh tổng của nguồn Co-60 cũng nằm trên nền Compton của các đồng vị phóng xạ có năng lượng lớn hơn 2505,7 keV và do đó tỷ số P/C cụ thể là bao nhiêu tùy thuộc khá nhiều vào cách chọn cửa sổ của nhà thực nghiệm khi xử lý phổ.

Hình 9 so sánh phổ gamma thông thường và phổ gamma sử dụng phương pháp trùng phùng tổng. Nền Compton của phổ trùng phùng tổng giảm hàng trăm lần so với phổ gamma thông thường.



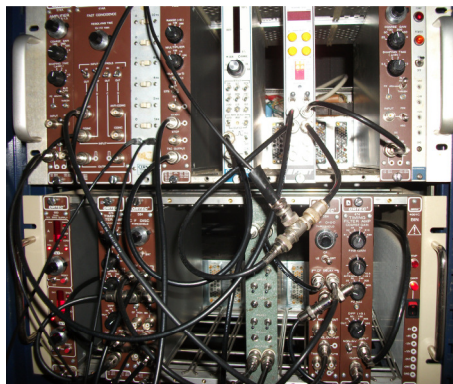
Hình 9. Phổ gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe với nguồn phóng xạ Co-60: thông thường (đường không liền nét màu đỏ), sau khi sử dụng phương pháp trùng phùng tổng (đường liền nét màu xanh).

Hình 10 trình bày ảnh của hệ thống phổ kế gamma sử dụng hai đầu dò bán dẫn HPGe với buồng chì bảo vệ và hệ thống điện tử kèm theo dùng cho ba thí nghiệm trùng phùng kể trên tại kênh số 3 lò phản ứng hạt nhân, Viện nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt.

Tổng hợp kết quả đo thực nghiệm trên các hệ thống phổ kế gamma khác nhau, những đặc trưng chính của hệ thống được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Tỷ số P/C của các hệ thống phổ kế sử dụng đầu dò HPGe.

Tên hệ thống	Phương pháp	FWHM (keV)	Tỷ số P/C	Hệ số làm tốt	Tài liệu tham khảo
Phổ kế gamma	Không trùng phùng	1,8	44	1	[1]
Phổ kế gamma trùng phùng thông thường	Trùng phùng	1,8	132	3	Công trình này
Phổ kế gamma trùng phùng (TAC)	Trùng phùng	1,8	132	3	Công trình này
Phổ kế gamma trùng phùng tổng	Trùng phùng tổng	1,8	850	19	Công trình này
Phổ kế triệt Compton	Đối trùng	1,8	264	6	[2]
Phổ kế triệt Compton	Đối trùng	1,8	396	9	[8]



Hình 10. Ảnh toàn cảnh hệ thống phổ kế gamma sử dụng hai đầu dò bán dẫn HPGe với buồng chì bảo vệ và hệ thống điện tử được sử dụng cho những thí nghiệm trùng phùng tại kênh số 3 lò phản ứng hạt nhân, Viện nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt.

KẾT LUẬN

Tác giả đã trình bày một số kết quả thực nghiệm thu được trên các thí nghiệm về phổ kế gamma trùng phùng sử dụng đầu dò HPGe và các khối điện tử chuẩn, đặc biệt là hệ thống phổ kế gamma trùng phùng tổng có tỷ số P/C rất cao tại Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt. Những kết quả thực nghiệm kể trên cho ta thấy rằng nếu sử dụng một cách hợp lý phần cứng và phần mềm của hệ thống phổ kế trùng phùng tổng cho nghiên cứu phản ứng chiếm bức xạ (n, γ), ($n, 2\gamma$) có thể tạo nên phổ kế gamma Compton rất thấp. So với kết quả thực nghiệm

về hệ thống thông thấp triệt Compton sử dụng đầu dò HPGe và NaI(Tl) có hệ số P/C được làm tốt là 6 [2] hoặc 9 [8] thì tỷ số P/C được làm tốt bằng 19 thu được trên hệ thống phổ kế gamma trùng phùng tổng là rất hấp dẫn đối với các nhà thiết kế phổ kế gamma thông thấp. Rào cản lớn nhất ứng dụng rộng rãi các hệ thống phổ kế này có lẽ là chi phí cho một hệ thống còn khá cao khoảng 100000 đô la. Tác giả chân thành cảm ơn Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt đã tạo điều kiện để thiết lập và tiến hành các thí nghiệm phổ kế trùng phùng gamma kể trên.

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE POSSIBILITY OF REDUCING BACKGROUND
FOR THE GAMMA COINCIDENCE SPECTROMETER WITH HIGH PURE
GERMANIUM DETECTORS**

Dinh Sy Hien

University of Science, VNU-HCM

ABSTRACT: *Gamma coincidence spectrometers with HPGe detectors are used for environmental research, nuclear reactions (n, γ), ($n, 2\gamma$) due to Compton backgrounds of their gamma spectra are very low. In this work, three types of coincidence spectrometers such as gamma coincidence spectrometer, gamma coincidence spectrometers with TAC and sum coincidence spectrometer using HPGe are described. Some experimental results obtained by using gamma coincidence spectrometers are presented. Especially, taking advantages of the software and hardware of the sum coincidence spectrometer used for research of nuclear reactions (n, γ), ($n, 2\gamma$), we have converted the spectrometer to one with very low background level.*

Key words: *gamma spectrometer using HPGe detector, gamma coincidence spectrometer, gamma sum coincidence spectrometer.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Canberra Nuclear Product Catalogue, Edition ten.
- [2]. D. S. Hien, Development of nuclear spectroscopy system using high resolution semiconductor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 373, 406-410, (1996).
- [3]. Đ. S. Hiền, *Điện tử Hạt nhân: Đầu dò bán dẫn và xử lý tín hiệu*, Nhà xuất bản ĐHQG HCM, (2005).
- [4]. A. M. Hoogenboom, A new method in gamma-ray spectroscopy: a two crystal scintillation spectrometer with improved resolution, *Nuclear Instruments* 3, 57- 68 (1958).
- [5]. H.H. Bolotin. *Thermal-neutron capture gamma-gamma coincidence studies and techniques*, Proceedings of the International symposium on neutron capture gamma-ray spectroscopy and related topics, 15- 34 (1981).
- [6]. S.T. Boneva et al., Two-step cascades of neutron radiative capture: 1. The spectroscopy of excited states of complex nuclei in the range of the neutron binding energy, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei* 22, 479 - 511 (1991).
- [7]. S.T. Boneva et al., Two-step cascades of neutron radiative capture: 2. Main parameters and peculiarities complex nuclei compound-states gamma-decay,

Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei 22, 1431-1475 (1991).

[8]. J. L. Parus et al., *Two low-level gamma spectrometry systems of the IAEA*

safeguards analytical laboratory, Proceedings of conference on low-background, Rossendorf/Dresden, 41- 44 (1997).