

Thiết kế chế tạo đầu đo nhấp nháy sử dụng tinh thể CsI(Tl) ghép nối với mảng nhân quang silicon

Nguyễn Văn Sỹ*, Đặng Quang Thiệu, Nguyễn Thanh Hùng

Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội

Ngày nhận bài 20/7/2022; ngày chuyển phản biện 22/7/2022; ngày nhận phản biện 18/8/2022; ngày chấp nhận đăng 23/8/2022

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, một đầu đo nhấp nháy đã được phát triển bằng cách sử dụng tinh thể CsI(Tl) ghép nối với mảng nhân quang silicon (SiPM - Silicon photomultiplier) nhằm thay thế cho ống nhân quang điện (PMT - Photomultiplier tube), với ưu điểm là đầu đo nhỏ gọn và tiết kiệm năng lượng. Tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) dạng hình hộp chữ nhật với kích thước 50x25x25 mm của Hãng Kinhheng và mô đun SiPM S13361-3050AE-08 có kích thước 25x25 mm của Hãng Hamamatsu đã được lựa chọn sử dụng. Mạch tiền khuếch đại, nguồn nuôi và ổn định nhiệt độ cũng đã được tích hợp vào trong đầu đo. Một số đặc trưng của đầu đo đã được đánh giá bằng cách sử dụng nguồn phóng xạ chuẩn ^{137}Cs cùng với hệ thiết bị phân tích phổ gamma đa kênh của Hãng Ortec và phần mềm phân tích phổ Gamma Vision. Kết quả cho thấy, độ phân giải năng lượng đối với đỉnh ^{137}Cs của đầu đo này là khoảng 8,03%, gần như tương đương với độ phân giải 7,87% của đầu đo sử dụng 76x76 mm tinh thể NaI(Tl) ghép nối với PMT của Hãng Canberra. Kết quả đánh giá độ ổn định theo thời gian khi nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo này không thay đổi cho thấy vị trí đỉnh phổ năng lượng và độ phân giải năng lượng đối với nguồn phóng xạ ^{137}Cs là hầu như không thay đổi theo thời gian hoạt động. Nghiên cứu cũng đã khảo sát độ ổn định của đầu đo theo nhiệt độ môi trường hoạt động và kết quả là biên độ xung ra thay đổi rất lớn theo nhiệt độ môi trường, biên độ xung ra giảm khi nhiệt độ môi trường tăng lên và ngược lại. Trong điều kiện nhiệt độ môi trường thay đổi từ 11 đến 50°C, vị trí đỉnh năng lượng của nguồn ^{137}Cs thay đổi là 1762 và 167 kênh, tương ứng trong các trường hợp không có và có sự điều chỉnh của chức năng ổn định biên độ xung ra theo nhiệt độ trong bộ nguồn nuôi SiPM. Khi đã có chức năng ổn định biên độ xung ra nhưng sự thay đổi vị trí đỉnh phổ năng lượng theo nhiệt độ môi trường hoạt động vẫn còn khoảng 4,3 kênh/°C, do đó cần tiếp tục nghiên cứu hiệu chỉnh sự ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến hoạt động của đầu đo này, nhằm cung cấp khả năng ứng dụng rộng rãi đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM thay thế cho PMT truyền thống trong tương lai.

Từ khóa: đầu đo nhấp nháy, mảng nhân quang silicon SiPM, tinh thể nhấp nháy CsI(Tl).

Chỉ số phân loại: 2.3

Đặt vấn đề

Đầu đo nhấp nháy thường được sử dụng khá phổ biến trong các hệ ghi đo hạt nhân bởi đặc tính là cấu tạo hệ đo đơn giản, hiệu suất ghi cao, đáp ứng được nhiều ứng dụng. Cấu tạo của đầu đo nhấp nháy truyền thống bao gồm tinh thể nhấp nháy và ống nhân quang điện (PMT). Tuy nhiên, PMT có nhược điểm là kích thước công kênh, nhạy cảm với từ trường và điện áp hoạt động cao, do đó đòi hỏi một không gian rộng rãi và dung lượng pin lớn [1, 2]. Đây là rào cản khi sử dụng các đầu đo nhấp nháy truyền thống trong việc chế tạo các thiết bị xách tay nhỏ gọn và tiết kiệm năng lượng.

Ngày nay với sự phát triển của công nghệ bán dẫn, các bộ nhân quang silicon (SiPM) đã được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi như một bộ biến đổi quang-điện trong nhiều lĩnh vực. SiPM được cấu tạo gồm hàng nghìn phần tử (microcell) được nối song song với nhau và sắp xếp thành hình chữ nhật, trong mỗi phần tử đó chứa một điốt quang

thác lũ (APD) hoạt động ở chế độ Geiger ghép nối tiếp với một điện trở có tác dụng khôi phục lại chế độ Geiger cho APD sau mỗi lần hấp thụ photon [3]. SiPM có khuếch đại nội cao, có thể tạo ra tín hiệu có biên độ xung và độ phân giải thời gian tương đương với PMT [4-8], do đó SiPM hoàn toàn có thể thay thế chức năng của PMT với ưu điểm là điện áp hoạt động thấp, không bị ảnh hưởng bởi từ trường, kích thước nhỏ gọn, phù hợp với việc chế tạo các thiết bị xách tay di động [8].

Hiện nay một số hãng trên thế giới cũng đã sản xuất và thương mại hóa các đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM thay thế cho PMT để ghi nhận phổ năng lượng bức xạ, các đầu đo đó có thể kể đến như: SIP-E3-X của Hãng Scionix, Sigma50 của Hãng Kromek, C12137 của Hãng Hamamatsu... Với những lý do trên công việc chế tạo đầu đo nhấp nháy sử dụng tinh thể CsI(Tl) ghép nối với SiPM đã được triển khai thực hiện trong nghiên cứu này.

*Tác giả liên hệ: Email: vansybn@gmail.com

Design and manufacture of scintillation detector using CsI(Tl) crystal coupled with silicon photomultipliers

Van Sy Nguyen*, Quang Thieu Dang,
Thanh Hung Nguyen

Hanoi Irradiation Center

Received 20 July 2022; accepted 23 August 2022

Abstract:

In this research, a scintillation detector was developed using the CsI(Tl) scintillator crystal coupled with a silicon photomultiplier (SiPM) to replace the photomultiplier tube (PMT), resulting in a compact and energy-efficient detector. A rectangular box-shaped CsI(Tl) scintillation crystal with dimensions of 50x25x25 mm from Kinheng and a SiPM module S13361-3050AE-08 with dimensions of 25x25 mm from Hamamatsu were selected to use. The preamplifier circuit, power supply, and temperature stabiliser have also been integrated into the detector. The characteristics of this detector were evaluated using a ¹³⁷Cs standard radioactive source together with Ortec's multichannel analyser device and Gamma Vision software for spectrum analysis. Results showed that the energy resolution for the ¹³⁷Cs peak of this detector is about 8.03%, which is almost equivalent to the energy resolution of 7.87% of the Canberra detector using 76x76 mm NaI(Tl) crystal coupled to the PMT. The results of the evaluation of stability over time when the operating ambient temperature of this detector with no change showed that the energy peak position and the energy resolution for the ¹³⁷Cs radioactive source are almost unchanged. The research also investigated the stability of the detector according to the operating ambient temperature. The results exhibited that the output pulse amplitude varies greatly with the ambient temperature, it decreases when the temperature increases and vice versa. Under the condition that the operating ambient temperature varies from 11°C to 50°C, the energy peak position of ¹³⁷Cs changes were 1762 and 167 channels, respectively in the cases without and with adjustment of output pulse amplitude stabilisation function in power supply for SiPM. When there is a function of output pulse amplitude stabilisation, the change in peak position according to operating ambient temperature is still about 4.3 channels/°C, so further research is needed to correct the influence of ambient temperature on the operation of this detector, to provide wide applicability of scintillation detector using SiPM to replace traditional PMT in the future.

Keywords: CsI(Tl) scintillation crystal, scintillation detector, silicon photomultiplier (SiPM).

Classification number: 2.3

Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

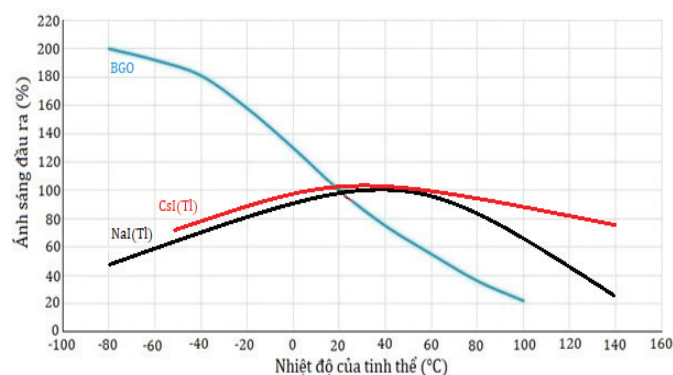
Lựa chọn cấu hình đầu đo

Tinh thể nhấp nháy thường sử dụng trong các đầu đo nhấp nháy có các loại như NaI, CsI, LaBr, BGO với các thông số kỹ thuật cơ bản như trình bày ở bảng 1. Từ bảng thông số này cho thấy để tinh thể nhấp nháy LaBr₃(Ce) đạt hiệu suất cao nhất do có mật độ và năng suất ánh sáng cao, đồng thời tinh thể này cũng cho độ phân giải tốt nhất. Tuy nhiên, đồng nghĩa với chất lượng là giá thành của tinh thể này cũng cao gấp hơn chục lần so với các loại tinh thể khác, do đó nó chỉ phù hợp với các thiết bị yêu cầu về độ phân giải tốt.

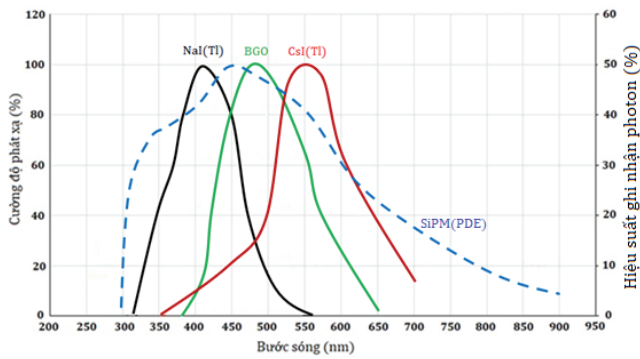
Bảng 1. Bảng thông số kỹ thuật cơ bản của một số loại tinh thể nhấp nháy [6].

Tinh thể nhấp nháy	Mật độ (g/cm ³)	Năng suất ánh sáng (ph/keV)	Bước sóng nhạy đỉnh (nm)	Thời gian phân rã (ns)	Bề dày nửa đỉnh photon 662 keV (cm)
NaI (Tl)	3,67	38	415	250	2,5
CsI (Tl)	4,51	54	550	1000	2,0
LaBr ₃ (Ce)	5,08	63	380	116	1,0
BGO	7,13	8	480	300	1,8

Đối với tinh thể BGO cho năng suất ánh sáng thấp và đặc biệt là ánh sáng đầu ra phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ môi trường hoạt động (hình 1). Hơn nữa, biên độ xung ra từ SiPM cũng thay đổi rất nhiều theo nhiệt độ môi trường hoạt động, do đó tinh thể nhấp nháy BGO không phải lựa chọn tối ưu cho nghiên cứu này. Tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) có ưu điểm hơn so với NaI(Tl) là mật độ và năng suất ánh sáng cao hơn, ánh sáng đầu ra ổn định hơn khi nhiệt độ môi trường thay đổi (hình 1). Theo thông số ở bảng 1 thì đầu đo sử dụng tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) cho độ phân giải tốt hơn khi sử dụng tinh thể NaI(Tl). Mặt khác, xét về độ phù hợp khi ghép nối các tinh thể này với SiPM thì theo đồ thị hình 2 cho thấy hiệu suất ghi nhận photon của SiPM tại bước sóng nhạy đỉnh của hai tinh thể này là tương đương nhau.



Hình 1. Sự phụ thuộc ánh sáng đầu ra theo nhiệt độ của một số tinh thể.

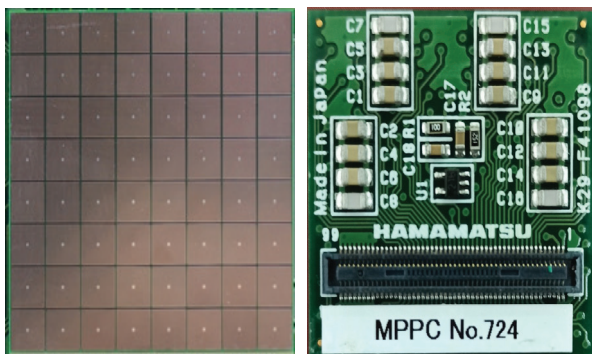


Hình 2. Cường độ phát xạ và hiệu suất ghi nhận photon của một số tinh thể.

Với những phân tích ở trên, tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) đã được lựa chọn để ghép nối với SiPM trong nghiên cứu chế tạo đầu đo nhấp nháy này. SiPM thường được chế tạo dạng hình vuông, do đó bề mặt ghép nối của tinh thể nhấp nháy cũng thường lựa chọn dạng hình vuông cho phù hợp. Qua tìm hiểu các loại tinh thể có sẵn trên thị trường, tinh thể CsI(Tl) với dạng hình hộp chữ nhật kích thước 50x25x25 mm đã được lựa chọn sử dụng trong nghiên cứu này.

Trong các kết quả nghiên cứu của T. Huang và cs (2017) [7], Z. Lin và cs (2019) [9] đều chỉ ra rằng, kích thước vùng nhạy của SiPM càng lớn gần với kích thước bề mặt ghép nối của tinh thể nhấp nháy thì đầu đo càng cho độ phân giải tốt hơn. Do đó nên chọn kích thước vùng nhạy của SiPM tương đương với kích thước bề mặt tinh thể ghép nối với SiPM là 25x25 mm.

Hiện nay các hãng đã phát triển các mảng SiPM có kích thước đến 25x25 mm như S14161-6050HS-04, S14161-3050HS-08, S13361-6050AE-04, S13361-3050AE-08 của Hãng Hamamatsu và ArrayC-60035-64P-PCB, ArrayJ-60035-64P-PCB, ArrayJ-30035-64P-PCB, ArrayJ-30020-64P-PCB của Hãng SensL. Với chú ý là kích thước microcell của SiPM càng lớn thì hệ số lấp đầy càng tăng và do đó hiệu suất ghi nhận photon càng tăng lên, do đó mảng SiPM S13361-3050AE-08 của Hãng Hamamatsu đã được lựa chọn sử dụng với cấu trúc và các thông số kỹ thuật cụ thể như ở hình 3 và bảng 2 dưới đây.



Hình 3. Cấu tạo mặt trước và sau của SiPM S13361-3050AE-08 [5].

Bảng 2. Bảng thông số của mảng SiPM S13361-3050AE-08 [5].

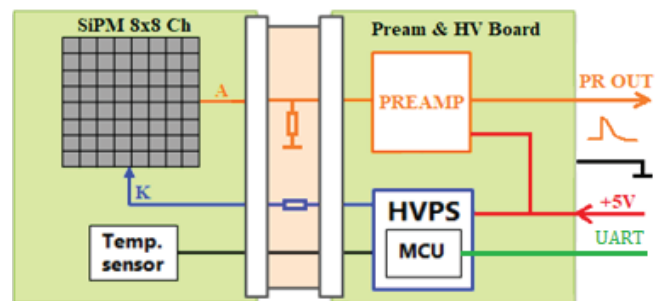
Đặc tính	Thông số	Đơn vị
Kích thước mảng SiPM	8x8	Kênh
Kích thước một kênh	3x3	mm
Kích thước microcell	50	µm
Dải bước sóng ghi nhận (λ)	320÷900	nm
Bước sóng nhạy đỉnh (λ_p)	450	nm
Hiệu suất ghi nhận photon (PDE)	40	%
Độ khuếch đại (M)	$1,7 \times 10^6$	--
Điện áp đánh thủng (V_{br})	53 ± 5	V
Điện áp hoạt động (V_{op})	$V_{br} + 3$	V
Hệ số bù nhiệt của điện áp hoạt động	54	mV/°C

Thiết kế hệ điện tử và cấu hình thực nghiệm

Độ khuếch đại nội của SiPM phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường hoạt động, độ khuếch đại giảm khi nhiệt độ môi trường tăng lên và ngược lại. Tuy nhiên, độ khuếch đại của SiPM cũng phụ thuộc vào điện áp nguồn nuôi cho SiPM, độ khuếch đại này tăng khi điện áp nguồn nuôi tăng và ngược lại. Dựa vào đặc trưng này, Hãng Hamamatsu đã chế tạo bộ nguồn nuôi cho SiPM có khả năng điều khiển điện áp đầu ra cung cấp cho SiPM theo đầu vào tín hiệu đo nhiệt độ môi trường làm việc của SiPM, từ đó có thể ổn định biên độ xung đầu ra của SiPM khi nhiệt độ môi trường hoạt động thay đổi. Tín hiệu đo được từ cảm biến nhiệt độ môi trường sẽ được đưa về một bộ vi xử lý trong bộ nguồn nuôi, thông qua hàm phụ thuộc và các thông số cài đặt, vi xử lý sẽ tính toán cho ra một giá trị điện áp phù hợp theo công thức sau:

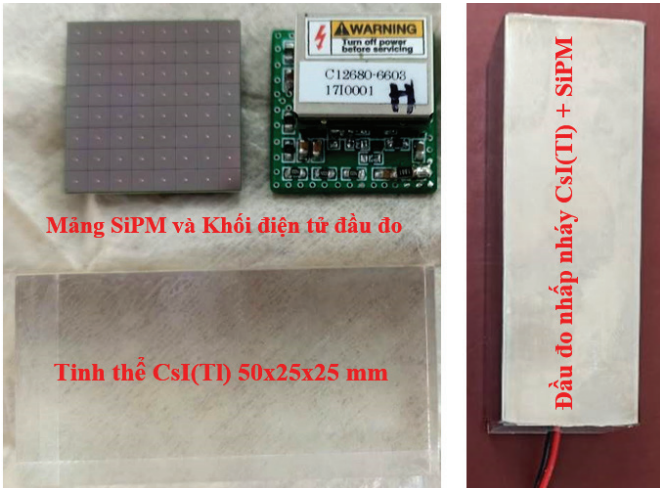
$$V_{op} = V_b + \Delta T \times (T - T_b)$$

trong đó: V_{op} là điện áp cung cấp cho SiPM ở nhiệt độ môi trường T ; V_b là điện áp cung cấp cho SiPM ở nhiệt độ môi trường chuẩn T_b ; ΔT là hệ số bù nhiệt; T là nhiệt độ thời điểm đo; T_b là nhiệt độ ban đầu.



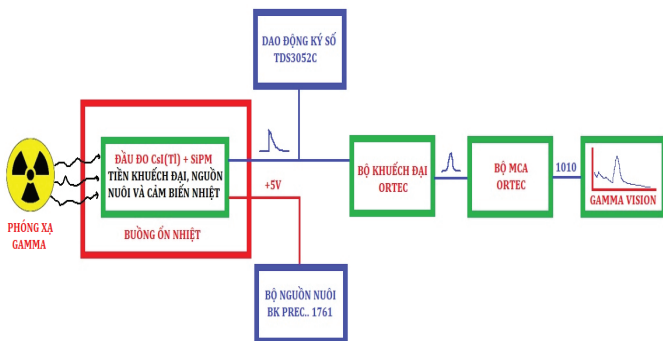
Hình 4. Sơ đồ ghép nối mảng SiPM với hệ mạch điện tử của đầu đo.

Hệ điện tử gồm bộ nguồn nuôi SiPM C11204 của Hãng Hamamatsu, cảm biến nhiệt độ, mạch tiền khuếch đại, cùng với tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) hình hộp chữ nhật kích thước 50x25x25 mm sử dụng bề mặt 25x25 mm ghép nối với mảng SiPM S13361-3050AE-08 kích thước 25x25 mm của Hãng Hamamatsu; được thiết kế đặt trong một vỏ hộp nhôm kín để bảo vệ tinh thể và chống nhiễu cho hệ điện tử đầu đo (hình 5).



Hình 5. Hình ảnh tinh thể, SiPM, hệ mạch điện tử và đầu đo hoàn thiện.

Để khảo sát và đánh giá các đặc trưng của đầu đo này, sơ đồ hệ thống thực nghiệm được thiết kế bao gồm: bộ tạo nguồn một chiều BK Precision model 1761 để cung cấp nguồn nuôi 5 V cho hệ điện tử đầu đo; hệ thiết bị phân tích phổ gamma đa kênh của Hãng Ortec cùng với phần mềm phân tích phổ Gamma Vision; dao động ký số TDS3052C của Hãng Tektronix; buồng ổn định nhiệt để tạo môi trường thử nghiệm đầu đo; nguồn phóng xạ chuẩn ^{137}Cs . (hình 6).



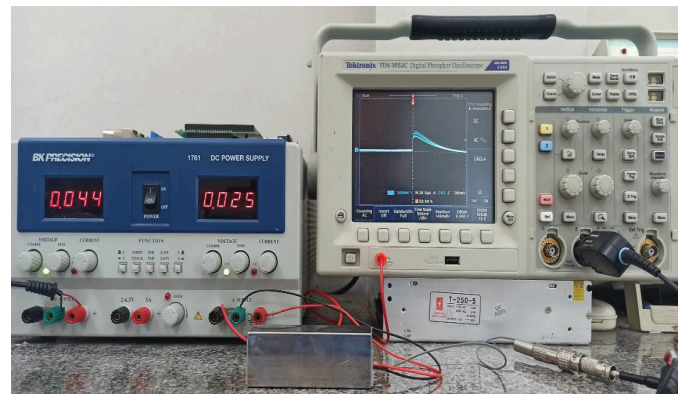
Hình 6. Sơ đồ bố trí thực nghiệm khảo sát các đặc trưng của đầu đo.

Kết quả và bàn luận

Khảo sát dạng xung lỗi ra và năng lượng tiêu thụ

Sử dụng bộ tạo nguồn một chiều BK Precision model 1761 để cấp nguồn nuôi 5 V cho đầu đo và quan sát thấy dòng điện tiêu thụ là 25 mA. Đây là giá trị hợp lý bởi bộ nguồn C11204 theo tài liệu của hãng tiêu thụ cỡ 20 mA, cộng thêm với dòng tiêu thụ của mạch tiền khuếch đại và của cảm biến nhiệt độ.

Sử dụng dao động ký số Tektronix TDS3052C quan sát tín hiệu đầu ra của tiền khuếch đại cho thấy một xung dương tín hiệu, với sườn lên của xung vào khoảng 6 và sườn xuống cỡ 90 μs như trên hình 7. Sườn xuống của tín hiệu xung này hoàn toàn phù hợp với hằng số thời gian của tiền khuếch đại đã thiết kế là 90 μs , và với thời gian phân rã của chớp sáng phát ra từ tinh thể nhấp nháy CsI(Tl) là 1 μs thì sườn lên của tín hiệu xung khoảng 6 μs cũng là hợp lý để toàn bộ điện tích do các photon tạo ra được nạp lên tụ phản hồi Cf.



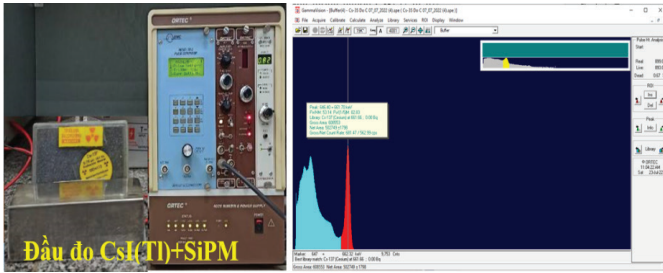
Hình 7. Tín hiệu xung ra và dòng điện tiêu thụ của đầu đo.

Đánh giá độ phân giải năng lượng

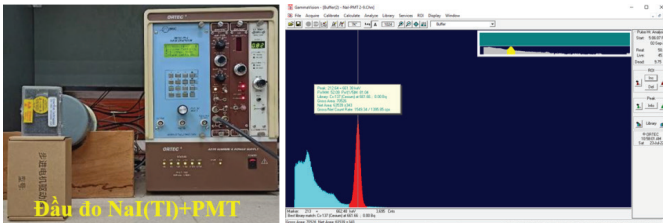
Một hệ thiết bị phân tích phổ gamma đa kênh của Hãng Ortec và phần mềm phân tích phổ Gamma Vision đã được lựa chọn sử dụng để khảo sát độ phân giải năng lượng đối với nguồn ^{137}Cs ở đỉnh 662 keV của đầu đo này và đầu đo nhấp nháy NaI(Tl) kích thước 76x76 mm sử dụng PMT của Hãng Canberra để so sánh.

Điều chỉnh hệ số khuếch đại phổ để có thể ghi nhận được đỉnh phổ năng lượng nguồn ^{137}Cs từ 2 đầu đo này xuất hiện ở cùng một vị trí kênh để tiện so sánh như ở hình 8 và 9. Các giá trị độ phân giải năng lượng với đỉnh 662 keV của đầu đo CsI(Tl)+SiPM trong nghiên cứu này và đầu đo NaI+PMT của Hãng Canberra tương ứng là 8,03 và 7,87%. Kết quả này

cho thấy, độ phân giải của đầu đo sử dụng 50x25x25 mm tinh thể CsI(Tl)+SiPM gần như tương đương với độ phân giải của đầu đo sử dụng 76x76 mm tinh thể NaI(Tl)+PMT.



Hình 8. Thực nghiệm đánh giá độ phân giải năng lượng của đầu đo CsI+SiPM.

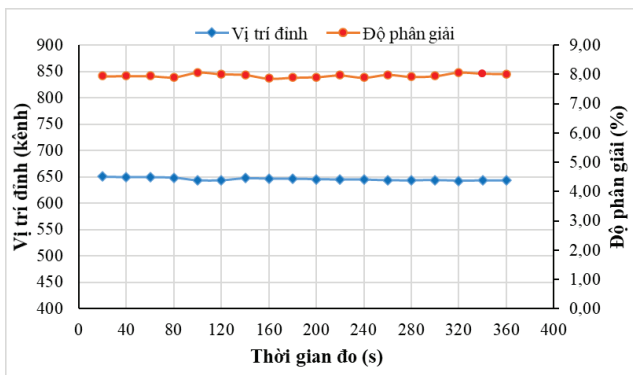


Hình 9. Thực nghiệm đánh giá độ phân giải năng lượng của đầu đo NaI+PMT.

Đánh giá độ ổn định theo thời gian

Thực nghiệm này được thực hiện với sơ đồ bố trí thí nghiệm như ở hình 6, theo đó nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo được duy trì ổn định ở 30°C trong suốt thời gian khảo sát. Thời gian lấy số liệu thực nghiệm là 6 giờ với thời gian 20 phút ghi nhận một phổ năng lượng nguồn ^{137}Cs , để đánh giá độ ổn định của vị trí đỉnh phổ và độ phân giải năng lượng đối với đỉnh 662 keV.

Kết quả khảo sát ở hình 10 cho thấy, vị trí đỉnh năng lượng 662 keV của nguồn ^{137}Cs thay đổi từ kênh 643 đến kênh 650 (khoảng 1,2%), còn độ phân giải năng lượng của

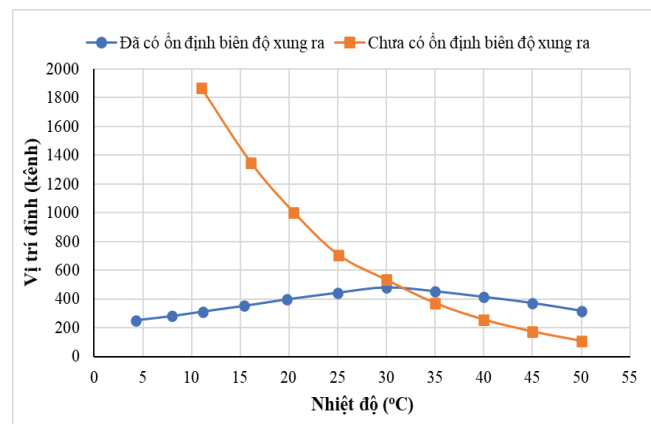


Hình 10. Độ ổn định của vị trí đỉnh và độ phân giải theo thời gian.

đỉnh 662 keV thay đổi từ 7,89 đến 8,08% (khoảng 2,4%). Như vậy, về cơ bản khi nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo này không thay đổi thì vị trí đỉnh phổ năng lượng và độ phân giải năng lượng đối với một nguồn phóng xạ là không thay đổi theo thời gian hoạt động của đầu đo.

Đánh giá độ ổn định theo nhiệt độ môi trường

Độ khuếch đại của SiPM thay đổi nhiều theo nhiệt độ môi trường hoạt động, để đánh giá sự thay đổi này, sơ đồ thí nghiệm ở hình 6 được sử dụng với việc cài đặt và duy trì nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo thông qua thiết bị buồng ổn nhiệt. Lấy số liệu khảo sát trong 2 trường hợp khi không có và có sự điều chỉnh của chức năng ổn định biên độ xung ra theo nhiệt độ trong bộ nguồn nuôi SiPM C11204 cho kết quả như ở hình 11. Trường hợp chưa có bộ ổn định biên độ xung ra, thực nghiệm này không lấy được số liệu vị trí đỉnh ở nhiệt độ dưới 11°C, bởi vì dưới nhiệt độ này thì biên độ xung ra từ đầu đo lớn vượt quá dải đo đã được định trước của hệ phân tích đa kênh (giá trị đỉnh ^{137}Cs ở vị trí lớn hơn kênh 2000 của hệ phân tích).



Hình 11. Đồ thị sự phụ thuộc của vị trí đỉnh theo nhiệt độ môi trường.

Kết quả này cho thấy, khi không có sự điều chỉnh của chức năng ổn định biên độ xung ra theo nhiệt độ trong bộ nguồn nuôi SiPM thì vị trí kênh của đỉnh ^{137}Cs thay đổi từ kênh 108 đến kênh 1870 (bằng 1762 kênh) trong khoảng nhiệt độ thay đổi từ 11 đến 50°C. Còn khi có sự điều chỉnh của chức năng ổn định biên độ xung ra trong bộ nguồn nuôi SiPM thì vị trí kênh của đỉnh ^{137}Cs thay đổi từ kênh 252 đến kênh 480 (bằng 228 kênh) trong khoảng nhiệt độ thay đổi từ 4,3 đến 50°C và bằng 167 kênh trong khoảng nhiệt độ thay đổi từ 11 đến 50°C.

Như vậy, với phương pháp bù nhiệt hiện tại trong chức năng của bộ nguồn nuôi này thì sự thay đổi của vị trí đỉnh ^{137}Cs đã giảm từ 1762 xuống 167 kênh trong khoảng nhiệt độ thay đổi từ 11 đến 50°C (bằng 4,3 kênh/°C). Với kết quả này thì biên độ xung ra từ đầu đo này vẫn còn thay đổi theo nhiệt độ môi trường hoạt động, nguyên nhân được lý giải là do giá trị thông số nhà sản xuất đưa ra chỉ dùng khi SiPM hoạt động riêng lẻ, không ghép nối với tinh thể. Đối với đầu đo này là sự ghép nối của SiPM với tinh thể CsI(Tl), ngoài thay đổi theo nhiệt độ của SiPM, còn có đóng góp sự thay đổi theo nhiệt độ của tinh thể. Do đó, để có thể sử dụng tốt đầu đo này trong điều kiện môi trường thì thông số về hệ số bù nhiệt của đầu đo cần phải khảo sát, xác định lại và có thể phải kết hợp thêm với phương pháp ổn định phổ khác nữa, chẳng hạn như phương pháp điều chỉnh hệ số khuếch đại số trong mạch khuếch đại phổ.

Kết luận

Nghiên cứu đã thiết kế chế tạo được một đầu đo nhấp nháy nhỏ gọn và ít tiêu thụ năng lượng, bằng cách sử dụng tinh thể CsI(Tl) ghép nối với mảng nhân quang silicon SiPM. Qua đánh giá một số đặc trưng của đầu đo này cho thấy độ phân giải năng lượng đối với đỉnh ^{137}Cs của đầu đo này gần như tương đương với độ phân giải của đầu đo nhấp nháy NaI(Tl) kích thước 76x76 mm ghép nối với PMT của Hãng Canberra. Khi nhiệt độ môi trường hoạt động không thay đổi thì vị trí đỉnh phổ và độ phân giải năng lượng đối với nguồn phóng xạ ^{137}Cs là hầu như không thay đổi theo thời gian hoạt động. Trường hợp nhiệt độ môi trường hoạt động thay đổi thì vị trí đỉnh phổ nguồn ^{137}Cs thay đổi rất lớn, ngay cả khi có sự điều chỉnh của chức năng ổn định biên độ

xung ra theo nhiệt độ trong bộ nguồn nuôi SiPM thì vẫn có thay đổi là 4,3 kênh/°C. Do đó, đầu đo này hiện có thể dùng tốt trong điều kiện phòng thí nghiệm duy trì nhiệt độ ổn định, tuy nhiên để có thể ứng dụng rộng rãi thay thế cho đầu đo nhấp nháy sử dụng ống nhân quang truyền thống PMT thì vấn đề hiệu chỉnh biên độ xung ra theo sự biến đổi của nhiệt độ môi trường hoạt động cho đầu đo này cần tiếp tục nghiên cứu khảo sát và hoàn thiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Sanaei, et al. (2015), “Characterization of a new silicon photomultiplier in comparison with a conventional photomultiplier tube”, *J. Mod. Phys.*, **6**, pp.425-433.
- [2] H.M. Park, K.S. Joo (2016), “Remote radiation sensing module based on a silicon photomultiplier for industrial applications”, *Radiat. Isot.*, **115**, pp.13-17.
- [3] <https://hub.hamamatsu.com/jp/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>, accessed 07-2020.
- [4] <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/index.html>, accessed 12-2019.
- [5] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13361-300_series_kapd1054e.pdf, accessed 01-2022.
- [6] <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/crystal-scintillators>.
- [7] T. Huang, et al. (2017), “NaI(Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics.*, **851**, pp.118-124.
- [8] V.D. Kovaltchouk, et al. (2004), “Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, **538**, pp.408-415.
- [9] Z. Lin, et al. (2019), “The design of a scintillation system based on SiPMs integrated with gain correction functionality”, *Nuclear Engineering and Technology*, **52**, pp.164-169.