

Hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo nhấp nháy SiPM

Nguyễn Văn Sỹ*, Nguyễn Thanh Hùng, Đặng Cung Kiêm, Đặng Quang Bảo

Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, Km 12, đường 32, phường Tây Tựu, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 19/4/2024; ngày chuyển phân biện 22/4/2024; ngày nhận phân biện 13/5/2024; ngày chấp nhận đăng 18/5/2024

Tóm tắt:

Bài báo trình bày một phương pháp nhằm ổn định xung đầu ra cho đầu đo nhấp nháy bộ nhân quang silicon (SiPM), sử dụng tinh thể CLYC(Ce) ghép nối với SiPM ghi nhận bức xạ gamma và neutron. Phương pháp này dựa trên đặc tính của SiPM là độ khuếch đại tăng khi điện áp phân cực tăng và giảm khi nhiệt độ tăng. Một nguồn điện áp phân cực cho SiPM được thiết kế sử dụng vi xử lý để quản lý và điều khiển giá trị điện áp đầu ra theo nhiệt độ môi trường hoạt động. Dữ liệu hiệu chỉnh về sự phụ thuộc vào nhiệt độ của đỉnh năng lượng nguồn ^{137}Cs (662 keV) được lưu trữ trong bộ nhớ. Tùy vào nhiệt độ môi trường đo được, vi xử lý sẽ tính toán và điều khiển điện áp phân cực cho SiPM. Kết quả cho thấy, trong dải nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo thay đổi từ 0,5 đến 45°C thì sự thay đổi của vị trí kênh đỉnh năng lượng 662 keV khi chưa hiệu chỉnh và khi đã hiệu chỉnh tương ứng là 247 và 5 kênh. Như vậy, phương pháp hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ của biên độ xung ra SiPM trong nghiên cứu này có thể phát triển rộng rãi trong các đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM thay thế cho ống nhân quang điện (PMT).

Từ khóa: bộ nhân quang silicon, CLYC(Ce), đầu đo nhấp nháy, nhiệt độ.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.2

Correcting the temperature dependence of the SiPM scintillation detector

Van Sy Nguyen*, Thanh Hung Nguyen, Cung Kiem Dang, Quang Bao Dang

Hanoi Irradiation Center, Vietnam Atomic Energy Institute, Km 12, Road 32, Tay Tuu Ward, Hanoi, Vietnam

Received 19 April 2024; revised 13 May 2024; accepted 18 May 2024

Abstract:

The article presents a method to stabilise the output pulse for the SiPM scintillation detector, which uses CLYC(Ce) scintillation crystal coupled with a silicon photomultiplier (SiPM) to measure gamma and neutron radiation. This method is based on the characteristic of SiPM that its gain increases with increasing bias voltage and decreases with increasing temperature. A bias voltage supply was designed for SiPM that uses a microprocessor to manage and control the output voltage value according to the operating ambient temperature. The corrected data on the temperature dependence of the 662 keV peak energy of ^{137}Cs radioactive source are stored in the memory. Depending on the measured ambient temperature, the microprocessor controls the bias voltage value for SiPM. The results show that in the operating temperature range of the detector from 0.5 to 45°C, the change of 662 keV peak energy position when uncorrected and corrected is 247 and 5 channels, respectively. Thus, the method of correcting the temperature dependence of the SiPM output pulse amplitude in this study can be widely developed in scintillation detectors using SiPM to replace the photomultiplier tube (PMT).

Keywords: CLYC(Ce), scintillation detector, silicon photomultiplier, temperature.

Classification numbers: 1.3, 2.2

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

1. Đặt vấn đề

Bộ nhân quang silicon (Silicon photomultiplier - SiPM) là lựa chọn thay thế tốt cho PMT để chế tạo đầu đo nhấp nháy với nhiệm vụ chuyển đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện và khuếch đại chúng thành giá trị đo được. SiPM có kích thước nhỏ gọn, có độ tin cậy cao hơn dưới các tác động cơ học, độ nhạy với từ trường thấp và chúng có thể hoạt động ở điện áp hoạt động thấp hơn đáng kể so với PMT. Việc sử dụng SiPM trong các đầu đo nhấp nháy cho phép thu nhỏ kích thước và tiết kiệm năng lượng để có được các đầu đo với độ phân giải năng lượng phù hợp trong nhiều ứng dụng [1].

Hiện nay, phát triển các đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM (gọi tắt là đầu đo nhấp nháy SiPM) đang trở thành xu hướng trong việc chế tạo các thiết bị ghi đo bức xạ xách tay nhỏ gọn. Tuy nhiên, SiPM có một số nhược điểm và đặc biệt là độ khuếch đại của chúng phụ thuộc đáng kể vào nhiệt độ môi trường làm việc, điều này làm cho việc sử dụng các đầu đo nhấp nháy SiPM trong điều kiện nhiệt độ môi trường không ổn định trở nên khó khăn [2]. Do đó, khi sử dụng các đầu đo này cần phải có phương pháp để hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho chúng.

Có 2 cách tiếp cận để ổn định đặc tính của SiPM theo nhiệt độ là phương pháp ổn định nhiệt độ môi trường hoạt động cho đầu đo SiPM [3-5] và phương pháp hiệu chỉnh lại sự phụ thuộc vào nhiệt độ của đầu đo SiPM [6, 7]. Tuy nhiên, phương pháp ổn định nhiệt độ môi trường cho đầu đo yêu cầu các giải pháp thiết kế phức tạp, tiêu hao năng lượng và không thể sử dụng trong các thiết bị xách tay di động. Phương pháp hiệu chỉnh sự phụ thuộc của các đặc tính đầu đo vào nhiệt độ, có ưu điểm là thiết kế đơn giản, ít tiêu hao năng lượng, nhưng không thể ổn định được hết các đặc tính của đầu đo mà phải lựa chọn một vài đặc tính thay đổi nhiều theo nhiệt độ và ảnh hưởng lớn đến kết quả của bài toán ứng dụng để thực hiện.

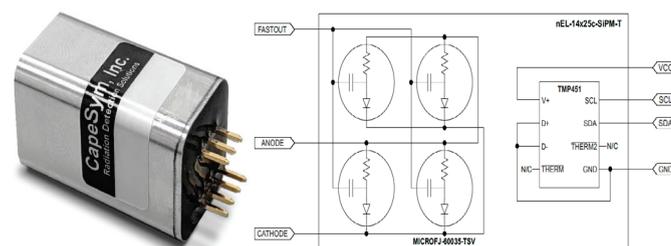
Đầu đo sử dụng SiPM thường được dùng trong các thiết bị xách tay di động, cần thiết kế đơn giản và tiêu thụ ít năng lượng. Do đó, phương pháp ổn định đặc tính cho đầu đo theo nhiệt độ trong nghiên cứu này là khảo sát thực nghiệm sự thay đổi và hiệu chỉnh lại sự phụ thuộc vào nhiệt độ của các đặc tính đầu đo [7, 8].

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu chính là một đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM của Hãng CapeSym là MacroPixel nEL-14x25c-SiPM-T (hình 1). Đây là một đầu đo nhấp nháy có khả năng ghi nhận bức xạ gamma và neutron dựa trên tinh thể CLYC

($\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$) ghép nối với mảng 2x2 SiPM (MicroFJ-60035-TSV), được sản xuất bởi Hãng CapeSym của Mỹ. Bên trong đầu đo đã tích hợp một cảm biến nhiệt độ cho phép theo dõi chính xác nhiệt độ của tinh thể và SiPM [9].

Đầu đo có kích thước tinh thể là 14x14x25 mm và có thể đo được từ năng lượng 10 keV, cho độ phân giải khoảng 5% ở đỉnh 662 keV với độ nhạy 90 cps/ $\mu\text{Sv.h}^{-1}$. Nguồn phân cực yêu cầu từ 26 đến 32 V, sự phụ thuộc của điện áp đánh thủng vào nhiệt độ là 21,5 mV/ $^\circ\text{C}$ [9], nghĩa là khi nhiệt độ tăng 1 $^\circ\text{C}$ thì điện áp đánh thủng của SiPM sẽ tăng lên 21,5 mV và chính điều này làm thay đổi độ khuếch đại của đầu đo.

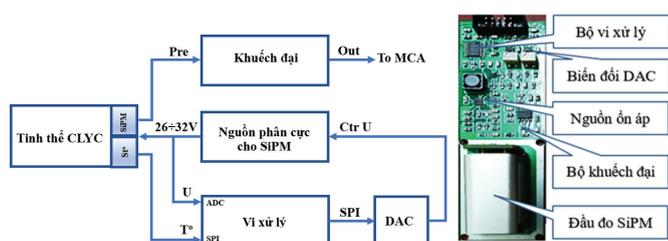


Hình 1. Hình ảnh và cấu tạo của đầu đo MacroPixel nEL-14x25c-SiPM-T.

SiPM được chế tạo từ vật liệu bán dẫn silicon có các đặc tính phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ môi trường làm việc. Tham số quan trọng nhất của SiPM phụ thuộc vào nhiệt độ chính là độ khuếch đại và sự phụ thuộc cơ bản của độ khuếch đại vào nhiệt độ có liên quan đến sự phụ thuộc của điện áp đánh thủng (V_{bd}) vào nhiệt độ. Mặt khác, độ khuếch đại của SiPM cũng phụ thuộc vào quá điện áp (V_{ov}), với sự gia tăng quá điện áp, độ khuếch đại của SiPM cũng tăng lên. Do đó, theo công thức (1) về điện áp phân cực của SiPM thì khi nhiệt độ tăng, điện áp V_{bd} sẽ tăng lên, làm cho quá điện áp V_{ov} giảm xuống, kéo theo độ khuếch đại của SiPM giảm xuống.

$$V_{op} = V_{bd} + V_{ov} \quad (1)$$

Để hiệu chỉnh độ khuếch đại của SiPM tăng trở lại cần làm cho quá điện áp tăng lên, và cách đơn giản nhất là tăng điện áp phân cực (V_{op}) cho SiPM. Đây là cơ sở lý thuyết cho phương pháp hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo nhấp nháy sử dụng SiPM. Một mạch điện tử đã được thiết kế với chức năng đo nhiệt độ môi trường thông qua cảm biến có sẵn trong đầu đo, sau đó dựa trên số liệu thực nghiệm về sự phụ thuộc của độ khuếch đại SiPM vào nhiệt độ môi trường để điều khiển lại giá trị nguồn điện áp phân cực cho SiPM thông qua bộ vi xử lý và bộ biến đổi DAC (hình 2).



Hình 2. Sơ đồ và mạch điện từ hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo.

Bộ vi xử lý STM32L031 sẽ định kỳ đọc nhiệt độ từ đầu đo thông qua kết nối SPI với cảm biến nhiệt độ. Dựa trên số liệu thực nghiệm được lưu trữ trong bộ nhớ vi xử lý, điện áp phân cực của đầu đo sẽ được xác định. Vi xử lý thông qua kết nối SPI với một bộ biến đổi DAC 12 bit, cung cấp điện áp thay đổi từ 0,7 đến 1,2 V tới tín hiệu điều khiển nguồn LT3842 để cho ra điện áp phân cực cho SiPM tương ứng từ 26 V đến 32 V với độ chính xác là ± 10 mV. Tất cả đầu đo, mạch khuếch đại, vi xử lý và bộ tạo nguồn phân cực được thiết kế trên một bản mạch có kích thước 100x30 mm và sử dụng nguồn nuôi 3 V với dòng tiêu thụ 20 mA.

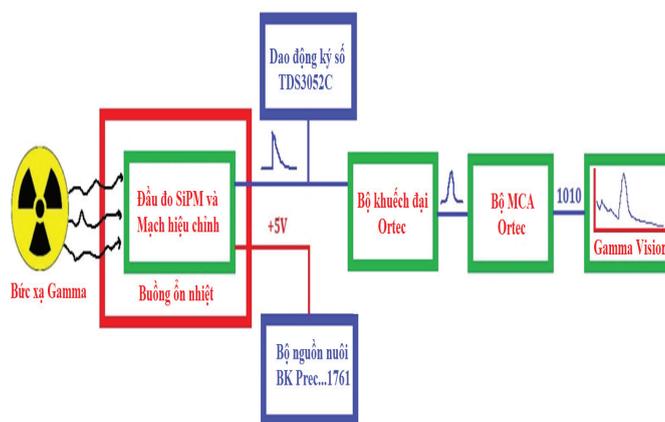
Thực nghiệm hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo được tiến hành với việc sử dụng một buồng ổn định nhiệt độ HH-2, cho phép cài đặt và duy trì nhiệt độ với độ chính xác $\pm 0,5^\circ\text{C}$ tạo môi trường hoạt động của đầu đo. Một nguồn phóng xạ chuẩn ^{137}Cs (9,87 μCi) và một thiết bị phân tích phổ biên độ đa kênh của Hãng Ortec kết hợp với phần mềm GammaVision, được sử dụng để ghi nhận phổ năng lượng và xác định vị trí đỉnh phổ (hình 3).



Hình 3. Nguồn phóng xạ, buồng ổn nhiệt và hệ phân tích phổ đa kênh Ortec.

Sơ đồ bố trí thực nghiệm như trên hình 4, cùng với các bước khảo sát lấy số liệu thực nghiệm như sau:

- Bước 1: Ổn định nhiệt độ buồng ổn nhiệt ở giá trị nhiệt độ $22,5^\circ\text{C}$ (điểm giữa của dải nhiệt độ khảo sát) và đặt giá trị điện áp phân cực cho SiPM tương ứng với nhiệt độ đó là 28,5 V (điểm giữa khoảng điện áp hoạt động của SiPM). Tiến hành đo và xác định vị trí kênh đỉnh 662 keV của nguồn ^{137}Cs , đây được coi là vị trí chuẩn để thực hiện quá trình hiệu chỉnh.



Hình 4. Sơ đồ bố trí thực nghiệm khảo sát độ trôi đỉnh phổ ^{137}Cs theo nhiệt độ.

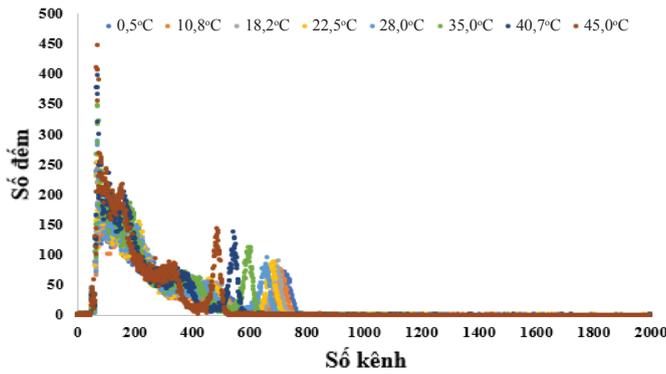
- Bước 2: Giữ nguyên giá trị điện áp phân cực SiPM ở 28,5 V, từng bước thay đổi các điểm nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo trong khoảng nhiệt độ khảo sát thông qua buồng ổn nhiệt. Tại mỗi điểm nhiệt độ đó, tiến hành đo phổ nguồn ^{137}Cs trong thời gian 60 giây và xác định vị trí đỉnh năng lượng 662 keV. Kết quả thu được dữ liệu các phổ và vị trí đỉnh 662 keV tương ứng với các điểm nhiệt độ khác nhau.

- Bước 3: Từng bước thay đổi các điểm nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo trong khoảng nhiệt độ khảo sát thông qua buồng ổn nhiệt. Tại mỗi điểm nhiệt độ, tiến hành đo phổ nguồn ^{137}Cs và điều chỉnh giá trị điện áp phân cực SiPM để hiệu chỉnh đỉnh năng lượng 662 keV về đúng vị trí chuẩn. Kết quả thu được một hàm phụ thuộc giữa điện áp phân cực SiPM và nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo.

- Bước 4: Cài đặt hàm phụ thuộc giữa điện áp phân cực SiPM và nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo vào trong bộ nhớ của vi xử lý. Tiến hành khảo sát ghi nhận dữ liệu phổ và xác định vị trí đỉnh 662 keV tại các điểm nhiệt độ khác nhau, ta có được số liệu về vị trí của đỉnh phổ tại các điểm nhiệt độ sau khi đã tiến hành hiệu chỉnh.

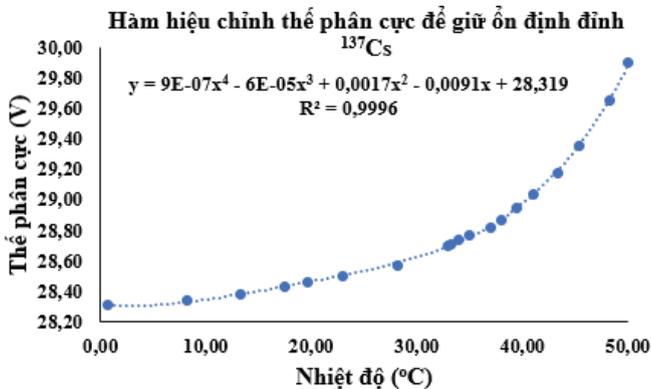
3. Kết quả và bàn luận

Kết quả khảo sát ghi nhận các dữ liệu phổ năng lượng nguồn ^{137}Cs ở các nhiệt độ môi trường khác nhau khi chưa có sự điều khiển của mạch hiệu chỉnh nhiệt độ được thể hiện trong hình 5. Kết quả cho thấy, khi nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo tăng lên thì biên độ xung tín hiệu ra của đầu đo càng giảm xuống, điều này là phù hợp với lý thuyết vì khi đó điện áp V_{bd} sẽ tăng lên, làm cho quá điện áp V_{ov} giảm xuống, kéo theo độ khuếch đại của SiPM bị giảm xuống.



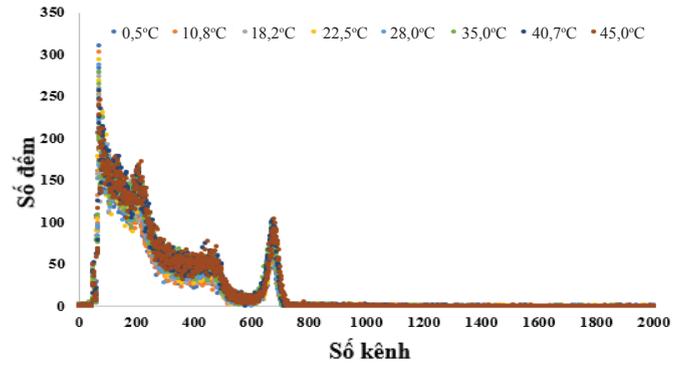
Hình 5. Phổ nguồn ^{137}Cs ở các nhiệt độ khác nhau trước khi hiệu chỉnh.

Kết quả khảo sát và xây dựng hàm phụ thuộc giữa điện áp phân cực SiPM và nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo để ổn định vị trí đỉnh năng lượng 662 keV của nguồn ^{137}Cs , được thể hiện trên hình 6. Kết quả khảo sát này cho thấy, ở điều kiện nhiệt độ môi trường hoạt động thấp, sự thay đổi biên độ xung ra của đầu đo ít hơn và khi nhiệt độ môi trường hoạt động của đầu đo càng tăng cao thì sự thay đổi đó càng lớn. Điều đó cho thấy, các đầu đo nhấp nháy sử dụng bộ nhân quang SiPM sẽ hoạt động ổn định hơn trong điều kiện nhiệt độ môi trường làm việc thấp.



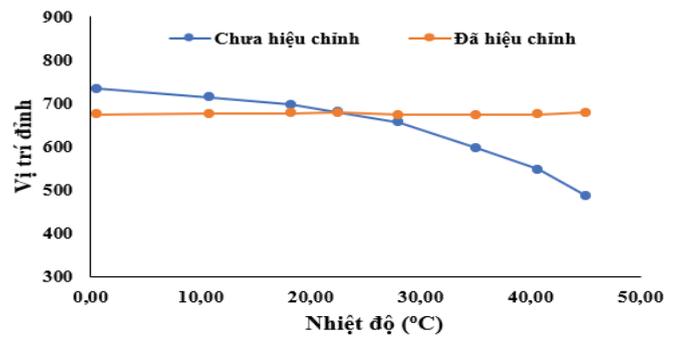
Hình 6. Sự phụ thuộc của thế phân cực của SiPM vào nhiệt độ môi trường.

Kết quả khảo sát ghi nhận các dữ liệu phổ năng lượng nguồn ^{137}Cs ở các nhiệt độ môi trường khác nhau, với sự điều khiển của mạch hiệu chỉnh nhiệt độ được thể hiện trong hình 7. Kết quả cho thấy, sau khi áp dụng phương pháp hiệu chỉnh sự thay đổi theo nhiệt độ thì vị trí kênh đỉnh 662 keV hầu như không có sự thay đổi, nghĩa là xung tín hiệu đầu ra của đầu đo được duy trì ổn định biên độ khi nhiệt độ môi trường thay đổi.



Hình 7. Phổ nguồn ^{137}Cs ở các nhiệt độ khác nhau sau khi hiệu chỉnh.

Phân tích đánh giá các kết quả số liệu trên hình 8 cho thấy, trong dải nhiệt độ thay đổi từ 0,5 đến 45°C, nếu không có sự hiệu chỉnh thay đổi theo nhiệt độ hoạt động của đầu đo, thì vị trí kênh đỉnh 662 keV thay đổi trung bình là 247 kênh, từ kênh 486 đến 733 (vào khoảng 50%). Sau khi áp dụng phương pháp này để hiệu chỉnh sự thay đổi theo nhiệt độ đó, vị trí kênh đỉnh 662 keV chỉ còn thay đổi trung bình là 5 kênh, từ kênh 673 đến 678 (vào khoảng 0,7%).



Hình 8. Vị trí đỉnh nguồn ^{137}Cs trước và sau khi hiệu chỉnh ở các nhiệt độ khác nhau.

So sánh với kết quả nghiên cứu của F. Licciulli và cs (2015) [7] cho thấy, mặc dù không cùng dải nhiệt độ khảo sát nhưng số liệu về độ ổn định vị trí kênh đỉnh từ 50% xuống 0,7% trong khoảng nhiệt độ thay đổi 44,5°C của nghiên cứu này cơ bản tương đồng với số liệu cải thiện từ 22 xuống 0,78% trong khoảng nhiệt độ thay đổi 10°C.

4. Kết luận

Một khối mạch điện tử thực hiện việc hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo nhấp nháy MacroPixel nEL-14x25c-SiPM-T, nhằm ổn định biên độ xung tín hiệu đầu ra, đã được phát triển và thử nghiệm bằng phương pháp điều khiển giá trị điện áp phân cực cho SiPM trên đầu đo này.

Thực nghiệm khảo sát sự thay đổi theo nhiệt độ của biên độ xung tín hiệu ra từ đầu đo cũng đã được thực hiện bằng cách xác định vị trí kênh đỉnh 662 keV của nguồn ^{137}Cs trên phổ kế gamma đa kênh.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, sự phụ thuộc vào nhiệt độ của biên độ xung ra từ đầu đo là rất lớn, thể hiện ở sự thay đổi vị trí kênh đỉnh 662 keV vào khoảng 50%, sau khi sử dụng phương pháp hiệu chỉnh, sự phụ thuộc vào nhiệt độ cho đầu đo đã cải thiện đáng kể về độ ổn định biên độ xung ra của đầu đo, sự thay đổi vị trí kênh đỉnh 662 keV chỉ thay đổi khoảng 0,7% trong cả dải nhiệt độ thực nghiệm từ 0,5 đến 45°C.

Như vậy, phương pháp hiệu chỉnh sự phụ thuộc biên độ xung ra của SiPM vào nhiệt độ trong nghiên cứu này có thể phát triển rộng rãi trong các đầu đo nhấp nháy, sử dụng SiPM thay thế cho PMT, ứng dụng trong việc chế tạo một số thiết bị xách tay nhỏ gọn, hoạt động trong điều kiện nhiệt độ môi trường không ổn định.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] V.D. Kovaltchouk, G.J. Lolos, Z. Papandreou, 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, DOI: 10.1016/j.nima.2004.08.136.

[2] B. Sanaei, M.T. Baei, S.Z.S. Alangi (2015), “Characterization of a new silicon photomultiplier in comparison with a conventional photomultiplier tube”, *J. Mod. Phys.*, **6**, pp.425-433, DOI: 10.4236/jmp.2015.64046.

[3] S. Nieswand (2012), *A Peltier Cooling System for SiPM Temperature Stabilization*, B.Sc. dissertation, CERN, Geneva, Switzerland, 56pp.

[4] G. Collazuol, M.G. Bisognia, S. Marcatilia, et al. (2011), “Studies of silicon photomultipliers at cryogenic temperatures”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sec. A*, **628(1)**, pp.389-392, DOI: 10.1016/j.nima.2010.07.008.

[5] A.V. Stolin, S. Majewski, R.R. Raylman (2013), “Novel method of temperature stabilization for SiPM-based detectors”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **60(5)**, pp.3181-3187, DOI: 10.1109/TNS.2013.2273398.

[6] Z. Li, Y. Xu, C. Liu, et al. (2012), “A gain control and stabilization technique for silicon photomultipliers in low-light-level applications around room temperature”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, **695**, pp.222-225, DOI: 10.1016/j.nima.2011.12.037.

[7] F. Licciulli, C. Marzocca (2015), “An active compensation system for the temperature dependence of SiPM gain”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **62(1)**, pp.228-235, DOI: 10.1109/TNS.2015.2388580.

[8] Z. Lin, B. Hautefeuille, S.H. Jung, 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, DOI: 10.1016/j.net.2019.07.005.

[9] CapeSym (2023), *MacroPixel nEL-14x25c-SiPM-T Datasheet*, <https://capescint.com/wp-content/uploads/MacroPixel-nEL-14x25c-SiPM-T-Datasheet.pdf>, accessed 20 March 2024.