VNUHCM Journal of Advanced Research and Natural Sciences 2026, 10(3):3770-3778

Open Access Full Text Article

Bài nghiên cứu

Mô hình hóa đáp ứng xung điện tử của detector EJ-276 ghép nối SiPM sử dụng Geant4

Phan Văn Chuân*

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Bộ nhân quang silicon (SiPM) là giải pháp thay thế tối ưu cho các ống nhân quang điện (PMT) trong các đầu dò nhấp nháy hiện đại nhờ hiệu suất phát hiện photon cao và thiết kế nhỏ gọn. Tuy nhiên, việc thiết kế và tối ưu hóa các hệ đo sử dụng SiPM vẫn đối mặt với thách thức lớn trong mô phỏng, do đặc tính đáp ứng phi tuyến phức tạp và sự hiện diện của các thành phần nhiễu tương quan. Các mô hình mô phỏng hiện nay thường rơi vào hai cực đoan: hoặc quá đơn giản dẫn đến sai số lớn, hoặc quá chi tiết ở cấp độ pixel gây quá tải tài nguyên tính toán. Nghiên cứu này đề xuất một giải pháp cân bằng bằng cách xây dựng mô hình lai hiệu năng cao cho hệ đầu dò nhấp nháy nhựa EJ-276 kết hợp mảng SiPM trong môi trường mô phỏng Geant4. Điểm cốt lõi của phương pháp là việc tích hợp hàm truyền đạt của mạch điện tử tương đương với các tham số đặc trưng thống kê của SiPM như nhiễu tối, bão hòa và nhiễu xuyên quang. Cấu hình hình học được thiết lập chi tiết bao gồm khối tinh thể nhấp nháy, lớp phản xạ và môi trường truyền dẫn quang học. Độ tin cậy của mô hình đã được kiểm chứng thông qua việc so sánh trực tiếp với dữ liệu thực nghiệm từ hệ đo sử dụng mảng SiPM AFBR-S4N44P163. Kết quả cho thấy sự tương đồng rất cao về đặc tính động học: mô hình đã tái tạo chính xác dạng xung tín hiệu với thời gian tăng (t_r) đạt 24,64 ns và thời gian giảm (t_f) đạt 174 ns. Bên cạnh đó, mô hình cũng phản ánh trung thực cấu trúc đa đỉnh của nhiễu xuyên quang và vị trí các bờ Compton đặc trưng khi tương tác với các nguồn bức xạ gamma chuẩn như ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na. Với hiệu suất tính toán tối ưu, đây là công cụ quan trọng hỗ trợ việc phân tích, đánh giá và thiết kế các hệ phổ kế bức xạ hỗn hợp thế hệ mới, cho phép rút ngắn thời gian thử nghiệm thực tế mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết.

Từ khoá: mô hình SiPM, đầu dò nhấp nháy, mô phỏng đầu dò nhấp nháy

Khoa Vật lý và Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Đà Lạt

Liên hệ

Phan Văn Chuân, Khoa Vật lý và Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Đà Lạt

Email: chuanpv@dlu.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 24-06-2025
- Ngày sửa đổi: 11-05-2026
- Ngày chấp nhận: 11-09-2026
- Ngày đăng: 25-09-2026

DOI : https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-arns.v10i3.1453

Check for updates

Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

GIỚI THIỆU

Trong các hệ đầu dò nhấp nháy hiện đại, bộ nhân quang silicon (Silicon Photomultiplier - SiPM) đang dần thay thế ống nhân quang điện (Photomultiplier Tubes - PMT) truyền thống trong vai trò bộ chuyển đổi quang-điện. Với cấu trúc mảng diode quang thác (Single-photon avalanche diodes – SPAD) hoạt động ở chế độ Geiger [1–4], SiPM thể hiện các tính năng vượt trội về hiệu suất phát hiện photon (PDE), kích thước nhỏ gọn và khả năng kháng nhiễu điện từ. Nhờ những đặc tính này, SiPM trở thành lựa chọn tối ưu để thay thế PMT, đặc biệt phù hợp với các thiết bị đo lường bức xạ di động cầm tay [5–7]. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa hiệu năng của các hệ đầu dò SiPM đòi hỏi các mô hình mô phỏng phải có khả năng dự báo chính xác đáp ứng tín hiệu. Khác với PMT, tín hiệu đầu ra của SiPM chịu tác động mạnh bởi các yếu tố phi tuyến và nhiễu tương quan, bao gồm hiệu ứng bão hòa, nhiễu xuyên quang và các xung chậm [5,7–10]. Do đó, độ chính xác của mô hình mô phỏng đóng vai trò then chốt trong các bài toán phân biệt dạng xung (PSD) nơtron/gamma, vốn đòi hỏi độ nhạy cao đối với các đặc trưng hình dạng xung [10,11].

Việc mô hình hóa SiPM hiện nay vẫn tồn tại sự đánh đổi giữa độ chính xác và chi phí tính toán. Các mô hình vĩ mô tuy tối ưu về tốc độ xử lý nhưng thường bỏ qua tính chất phi tuyến của nhiễu tương quan, gây sai số lớn khi tín hiệu bị chồng chập [9,12,13]. Ngược lại, các mô hình vi mô mô phỏng chi tiết từng tế bào SPAD lại yêu cầu tài nguyên tính toán quá lớn, không khả thi cho các hệ đo lường diện rộng hoặc xử lý thời gian thực [5,8].

Nhằm giải quyết bài toán tối ưu hóa giữa độ chính xác và hiệu suất, nghiên cứu này đề xuất kiến trúc mô hình lai cho SiPM sử dụng trong đầu dò nhấp nháy. Mô hình kết hợp hàm truyền đạt của mạch điện tử với các đặc trưng thống kê của các nguồn nhiễu phi tuyến chủ yếu như xung tối, bão hòa và xuyên quang. Phương pháp này cho phép tái tạo trung thực đáp ứng biên độ và thời gian của xung đầu dò với chi phí tính toán giảm đáng kể so với các mô phỏng cấp độ microcell (pixel). Đây là cơ sở quan trọng để phân tích và tối ưu hóa thiết kế các hệ đầu dò nhấp nháy thế hệ

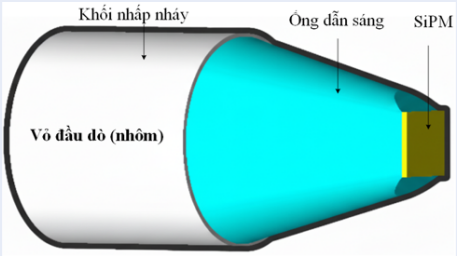
Trích dẫn bài báo này: Chuân P V. **Mô hình hóa đáp ứng xung điện tử của detector EJ-276 ghép nối SiPM sử dụng Geant4**. *VNUHCM J. Adv. Res. Nat. Sci.* 2026; 10(3):3770-3778.

mới sử dụng SiPM.

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Mô phỏng hình học và tương tác bức xạ

Hệ đầu dò nhấp nháy EJ-276 kết hợp SiPM được mô phỏng trên nền tảng Geant4 (phiên bản 10.7) nhằm tối ưu hóa quá trình vận chuyển photon quang học[14,15]. Cấu hình hình học (Hình 1) bao gồm khối nhấp nháy nhựa hữu cơ EJ-276 (Ø51 mm × 51 mm) kết nối với bề mặt nhạy của SiPM thông qua ống dẫn sáng (Acrylic) dạng hình chóp cụt. SiPM được mô hình hóa bằng một lớp vật liệu Silic có kích thước tương ứng với diện tích bề mặt nhạy sáng thực tế. Toàn bộ hệ thống được bao bọc bởi lớp vỏ nhôm nhằm thiết lập điều kiện biên phản xạ, tối ưu hóa hiệu suất thu nhận ánh sáng. Nhằm đảm bảo độ chính xác cho các tương tác bức xạ năng lượng thấp, danh sách vật lý tham chiếu QGSP_BIC_HP_EMZ đã được lựa chọn. Cụ thể, phân hệ QGSP_BIC_HP được sử dụng để mô tả chi tiết các quá trình tán xạ và bắt nơtron $E < 20\ MeV$ trên các hạt nhân ^{1}H và ^{12}C trong vật liệu EJ-276[16]. Các tương tác điện từ được xử lý bởi G4EmStandardPhysics_option4 (EMZ) nhằm đạt độ chính xác cao nhất cho hạt tích điện, đồng thời lớp G4OpticalPhysics được tích hợp để quản lý quá trình sinh và vận chuyển photon (phát xạ nhấp nháy, bức xạ Cherenkov và tán xạ Rayleigh)[14,15].



Hình 1: Cấu hình của hệ đầu dò trong mô phỏng Geant4. [Nguồn: Tác giả].

Đặc trưng quang học và bề mặt tiếp giáp

Các đặc tính quang học của vật liệu nhấp nháy và môi trường truyền dẫn được thiết lập thông qua lớp G4MaterialPropertiesTable[14,15]. Trong khi tổng lượng sáng phát ra (SCINTILLATIONYIELD) được khai báo dưới dạng hằng số, các đại lượng phụ thuộc năng lượng photon như chiết suất (RINDEX), độ dài hấp thụ (ABSLENGTH) và phổ phát xạ (FASTCOMPONENT) được định nghĩa bằng các chuỗi dữ liệu rời rạc (property vectors)[16]. Nghiên cứu tận dụng cải tiến của Geant4 phiên bản 10.7 để mô hình hóa quá trình phát quang với cấu trúc đa thành phần thời gian. Các hằng số thời gian phân rã SCINTILLATIONTIMECONSTANT1/2/3) và tỉ trọng đóng góp tương ứng (SCINTILLATIONYIELD1/2/3) được cấu hình chính xác dựa trên đặc tính vật lý của vật liệu EJ-276. Việc mô tả chi tiết sự phân bổ thời gian này là tiền đề quan trọng để tái tạo hình dạng chính xác của xung tín hiệu, phục vụ các thuật toán phân biệt hình dạng xung (PSD).

Tính chất tại các bề mặt tiếp giáp được định nghĩa qua lớp G4OpticalSurface và gán cho các biên giới vật lý bằng G4LogicalBorderSurface. Mô hình UNIFIED được áp dụng để mô tả chi tiết độ nhám và tính chất phản xạ của bốn bề mặt tiếp xúc chính: (*i*) Khối nhấp nháy/vỏ nhôm; (*ii*) Khối nhấp nháy/ống dẫn sáng; (*iii*) Ống dẫn sáng/vỏ nhôm; và (*iv*) Ống dẫn sáng/SiPM. Cấu hình bề mặt được thiết lập cụ thể với kiểu groundbackpainted cho các bề mặt phản xạ khuếch tán (vỏ nhôm, sơn phản quang) và kiểu polishedfrontpainted cho các bề mặt nhẵn bóng hoặc phản xạ gương. Đối với SiPM, bề mặt nhạy sáng được mô hình hóa với hiệu suất phát hiện photon (PDE) và hệ số phản xạ (REFLECTIVITY) phụ thuộc năng lượng dựa trên dữ liệu kỹ thuật từ nhà sản xuất[14,17]. Cơ chế ghi nhận tín hiệu tuân theo nguyên lý Monte Carlo: một photon được xác định là "phát hiện" khi biến ngẫu nhiên σ (phân bố đều trong khoảng [0, 1]) thỏa mãn điều kiện $\sigma < PDE\left(E_y\right)$ với E_y là năng lượng photon tới.

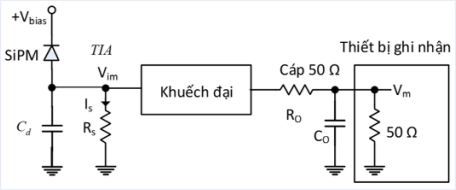
Mô hình đáp ứng điện tử lai

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình lai nhằm tối ưu hóa sự cân bằng giữa độ chính xác vật lý và hiệu suất tính toán. Mô hình được xây dựng dựa trên sự kết hợp giữa đáp ứng xung của hệ thống điện tử và các đặc tính thống kê phi tuyến của SiPM.

Mô hình mạch tương đương và đáp ứng xung hệ thống

Đáp ứng điện tử của hệ đầu dò được xác định thông qua mô hình mạch tương đương tích hợp giữa cấu trúc pixel của SiPM và mạch chuyển đổi dòng điện – điện áp (Transimpedance Amplifier-TIA, được trình bày trên Hình 2. Hàm truyền đạt của hệ thống trong miền Laplace, $H_{total}\left(S\right)$, được thiết lập bằng cách kết hợp các tham số ký sinh của SiPM (điện dung của SiPM C_d là tổng điện dung của các pixel C_p và điện dung lưới C_g) và các thành phần của bộ khuếch đại thuật toán[8,12].

Hàm truyền của SiPM kết hợp với khối TIA và phối hợp trở kháng đường truyền có dạng bậc cao như



Hình 2: Mô hình tương đương tích hợp giữa SiPM với mạch khuếch đại. [Nguồn: tác giả].

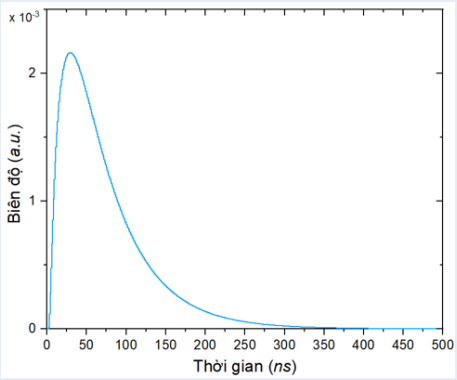
(1)[3,8,9].

$$H_{total}(S) = R_s \frac{\tau_1 s+1}{(\tau_2 s+1)(\tau_3 s+1)} \cdot \frac{A_{CL1}.A_{CL2}}{(1+\tau_{p1}s)(1+\tau_{p2}s)} \cdot \frac{1/2}{R_O C_O s+1} \quad (01)$$

Trong đó: $\tau_1 = R_q C_q$; $\tau_2 = R_q(C_d + C_q)$; $\tau_3 = R_s(C_{eq} + C_g)$ là các hằng số thời gian đặc trưng của SiPM; A_{CL1}, A_{CL2} lần lượt là hệ số khuếch đại của tầng thứ nhất và tầng thứ hai được thiết kế; $\tau_{p1} = \frac{1}{\omega_{C1}}$ v $\tau_{p2} = \frac{1}{\omega_{C2}}$ lần lượt là thời hằng của Op-Amp của tầng thứ nhất và tầng thứ hai; R_0 là trở kháng đầu ra và C_0 là điện dung tương đương tại ngõ ra, bao gồm điện dung ký sinh của mạch và điện dung của cáp truyền dẫn tín hiệu. Đáp ứng xung tổng quát của toàn hệ thống $H_{total}(t)$ thu được qua phép biến đổi Laplace ngược:

$$H_{total}(t) = L^{-1}\{H_{total}(S)\} \quad (02)$$

Hàm $H_{total}(t)$ đại diện cho hình dạng xung chuẩn của một photon đơn lẻ sau khi đi qua toàn bộ chuỗi xử lý điện tử, có dạng như Hình 3.



Hình 3: Hàm đáp ứng $H_{total}(t)$. [Nguồn: tác giả].

Tích hợp nhiễu phi tuyến và tái tạo tín hiệu đầu ra

Khác với các phương pháp tiếp cận tuyến tính thông thường, mô hình lai đề xuất tích hợp các hiệu ứng phi tuyến đặc trưng của SiPM thông qua các thuật toán thống kê[9,13]. Các thành phần nhiễu tương quan, bao gồm nhiễu tối (DCR) và nhiễu xuyên quang, được mô hình hóa bằng phân bố Poisson[8,12]. Trong đó, mỗi xung nhiễu được xử lý như một biến cố độc lập, có cùng hàm đáp ứng $H_{total}(t)$ nhưng có sự dịch chuyển về thời gian thực tế. Đối với hiệu ứng bão hòa, do nghiên cứu tập trung vào vùng cường độ bức xạ thấp đến trung bình và sử dụng dòng SiPM mật độ cao, xác suất nhiều photon kích hoạt đồng thời cùng một pixel là không đáng kể. Do đó, đáp ứng của đầu dò được giả định vận hành trong vùng tuyến tính. Việc lược bỏ hiệu ứng bão hòa là một giải pháp tối ưu nhằm giảm thiểu khối lượng tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết cho mô hình.

Tín hiệu điện áp dạng số ở đầu ra cuối cùng, $V_{out}(k)$, được tái tạo thông qua phép tổng chập rời rạc giữa cường độ photon đầu vào $L(m)$ trích xuất từ mô phỏng Geant4 và đáp ứng xung tổng hợp $H_{total}(t)$:

$$V_{out}(k) = \sum_{m-0}^{k} L(m).h_{total}(k-m) \quad (03)$$

Phương pháp tiếp cận này cho phép tái hiện chính xác các đặc trưng động học (thời gian tăng, thời gian giảm) và biên độ của xung tín hiệu. Quan trọng hơn, mô hình vĩ mô này giúp tiết kiệm tài nguyên tính toán đáng kể khi không cần mô hình hóa chi tiết cấu trúc bán dẫn của hàng ngàn pixel SiPM đơn lẻ, nhưng vẫn đảm bảo tính thực tiễn trong các bài toán mô phỏng hệ phổ kế bức xạ.

Tích hợp nhiễu và hiệu ứng phi tuyến

Để tái tạo chính xác đáp ứng thực tế của hệ đầu dò, mô hình lai tích hợp các thành phần nhiễu nội tại và đặc tính phi tuyến đặc trưng của SiPM thông qua cơ chế lấy mẫu thống kê và chồng chập tín hiệu ở giai đoạn hậu xử lý. Các biến động ngẫu nhiên do nhiệt (Dark Count Rate - DCR) được mô hình hóa dưới dạng quá trình Poisson, trong đó số lượng sự kiện nhiễu tối (N_{DCR}) phát sinh trong cửa sổ thời gian mô phỏng được xác định dựa trên giá trị kỳ vọng đặc trưng của thiết bị[17]. Các xung này được xử lý như các biến cố đơn quang điện tử (1 p.e.) và được cộng tuyến tính vào tín hiệu quang tổng hợp. Tương tự, nhiễu xuyên quang (Optical Crosstalk) được tích hợp qua cơ chế kích hoạt ngẫu nhiên có điều kiện. Với mỗi sự kiện sơ cấp, xác suất xảy ra nhiễu xuyên quang (P_{CT}) được thiết lập dựa trên thông số kỹ thuật từ nhà sản xuất ($P_{CT} = 15\%$)[12,17]. Khi hiện tượng này xảy ra, biên

độ xung được gia tăng rời rạc tương ứng với số lượng pixel bị kích hoạt đồng thời (n), tuân theo phân bố Poisson.

Mối quan hệ phi tuyến giữa số lượng pixel thực tế được kích hoạt (N_{fired}) và số lượng photon tới (N_{ph}) được mô tả bởi biểu thức giải tích (4) [18,19].

$$N_{fired} = N_{total}\left[1 - e^{-\left(\frac{N_{ph}.PDE}{N_{total}}\right)}\right] \quad (04)$$

Trong đó: N_{total} là tổng số pixel của SiPM; PDE là hiệu suất phát hiện photon. Cơ chế này xác lập giới hạn dải động của thiết bị khi vận hành dưới cường độ bức xạ cao. Tuy nhiên, trong các cấu hình đo lường cường độ thấp đến trung bình, do xác suất trùng phùng photon trên cùng một pixel là không đáng kể, hiệu ứng bão hòa có thể được lược bỏ nhằm tối ưu hóa tài nguyên tính toán mà vẫn đảm bảo độ tin cậy của mô hình. Việc tích hợp các tham số này cho phép mô hình phản ánh đầy đủ các biến động ngẫu nhiên và giới hạn vật lý nội tại, thay vì chỉ tái tạo dạng xung lý tưởng.

Xác thực tham số thực nghiệm

Để đảm bảo độ tin cậy của mô hình mô phỏng, các tham số đặc trưng của SiPM và mạch khuếch đại được xác định thông qua sự phối hợp giữa dữ liệu kỹ thuật từ nhà sản xuất và các phép đo thực nghiệm chuyên biệt. Nghiên cứu sử dụng mảng SiPM AFBR-S4N44P163 (Broadcom) làm đối tượng thực nghiệm chính [17].

Trích xuất tham số điện của SiPM

Quy trình xác định các tham số nội tại: R_q, C_d, C_q và C_g được thực hiện qua các bước chuẩn hóa sau:

Điện trở dập tắt (R_q): Giá trị R_q được trích xuất từ độ dốc của đặc tuyến I-V trong chế độ phân cực thuận (Hình 4). Tại vùng tuyến tính, mảng N pixel hoạt động tương đương mạng lưới N điện trở mắc song song, cho phép tính toán chính xác giá trị R_q cho từng vi tế bào.

Các thành phần điện dung ký sinh: Tổng điện dung pixel $C_{picel} = C_d + C_q$ được suy ra từ mối quan hệ tuyến tính giữa hệ số khuếch đại (G) và điện áp quá áp (V_{ov}).

Phân tích phổ trở kháng: Bằng phương pháp kích thích tín hiệu hình sin và phân tích đáp ứng dòng-áp, các thành phần điện dung diode (C_d), điện dung ký sinh dập tắt (C_q) và điện dung lưới kim loại (C_g) được tách lọc dựa trên thành phần điện dẫn đo được (G_m) tại các tần số khảo sát.

Các tham số sau khi trích xuất được tổng hợp tại Bảng 1 và Bảng 2, đóng vai trò là dữ liệu đầu vào cho mô hình mạch tương đương trong miền Laplace.

Bảng 1: Giá trị các tham số của SiPM AFBR-S4N44P163

STT	Tham số	Giá trị
1	R_q	644783 Ω
2	C_d	85,30 fF
3	C_q	26,05 fF
4	C_g	20 pF
5	C_{eq}	300,5 pF
6	R_s	20 Ω

[Nguồn: tác giả].

Bảng 2: Các thông số thiết kế cho bộ khuếch đại sử dụng LMH6629 [20] và AD8099 [21] .

STT	Tham số	Giá trị
1	GBWP1	900 MHz
2	A_{OL1}	7943
3	A_{CL1}	42
4	τ_{p1}	7,07ns
5	R_{f1}	750 (Ω)
6	R_{g1}	75 (Ω)
7	R_O	50 (Ω)
8	GBWP2	3800 MHz
9	A_{OL2}	17783
10	A_{CL2}	10
11	τ_{p2}	0,42 ns
12	R_{f2}	357 (Ω)
13	R_{g2}	40 (Ω)
14	C_O	300 pF

[Nguồn: tác giả].

Xác lập thông số bộ khuếch đại

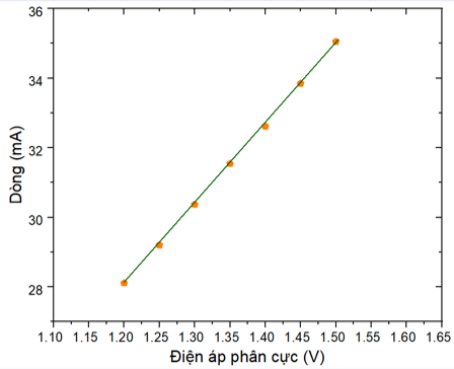
Mô hình hàm truyền đạt của khối khuếch đại được xây dựng dựa trên cấu hình thực tế gồm hai tầng khuếch đại nối tiếp sử dụng các Op-Amp tốc độ cao LMH6629 và AD8099.

Tầng 1: Thiết lập với hệ số khuếch đại vòng kín $A_{CL1} = 42$ và thời hằng $\tau_{p1} = 7,07\ ns$ dựa trên băng thông GBWP 900 MHz của LMH6629.

Tầng 2: Thiết lập với $A_{CL2} = 10$ và thời hằng $\tau_{p2} = 0,42\ ns$ ứng với GBWP 3800 MHz của AD8099.

Phối hợp trở kháng: Trở kháng đầu ra $R_O = 50\Omega$ và điện dung tương đương $C_O = 300\ pF$ (bao gồm cáp truyền dẫn) được tích hợp để đảm bảo tính toàn vẹn

của tín hiệu khi truyền tới hệ thu nhận dữ liệu. Việc xác thực đồng thời cả tham số cảm biến và mạch đọc cho phép thiết lập hàm đáp ứng xung tổng thể $H_{total}(S)$, phục vụ cho phép tổng chập tái tạo xung tín hiệu với độ sai lệch tối thiểu so với thực nghiệm.



Hình 4: Đường cong thực nghiệm I-V của AFBR-4N44P163. [Nguồn: tác giả].

Mô phỏng phổ đáp ứng năng lượng

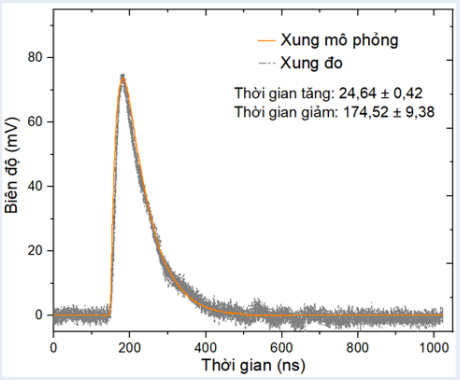
Để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình, các nguồn gamma chuẩn ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na đã được tiến hành mô phỏng phổ đáp ứng năng lượng với đầu dò. Phổ chiều cao xung (Pulse Height Spectra) được xây dựng thông qua phân tích thống kê biên độ tín hiệu đầu ra mô phỏng. Trong đó, vị trí các bờ Compton (Compton edges) được sử dụng làm tham chiếu chính để đánh giá độ chính xác và thực hiện hiệu chuẩn năng lượng cho hệ thống [1,6,16].

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng các

Độ tin cậy của mô hình mô phỏng trong Geant4 được đánh giá thông qua đối sánh thực nghiệm trên hệ đo sử dụng đầu dò EJ-276 kết hợp SiPM và nguồn phóng xạ ^{60}Co. Tín hiệu thực nghiệm được số hóa bởi bo mạch DRS4 (băng thông 900 MHz, trở kháng 50Ω). Nhằm đảm bảo tính đồng nhất trong phân tích, dữ liệu từ cả hai phương pháp đều được chuẩn hóa về chu kỳ lấy mẫu 1 ns.

Kết quả tại Hình 5 cho thấy sự tương quan chặt chẽ về đặc trưng động học giữa xung mô phỏng và thực nghiệm tại mức biên độ đỉnh 76 mV. Cả hai tín hiệu đều thể hiện sự đồng nhất cao ở sườn lên nhanh $(t_r \approx 24,64\ ns)$ và sườn xuống chậm $(t_f \approx 147\ ns)$. Sự phù hợp ở sườn trước xác thực độ chính xác của mô hình trong việc tái tạo đáp ứng biên độ. Trong khi đó, sự tương đồng ở sườn sau khẳng định độ tin cậy



Hình 5: So sánh dạng xung mô phỏng với xung đo thực nghiệm. [Nguồn: tác giả].

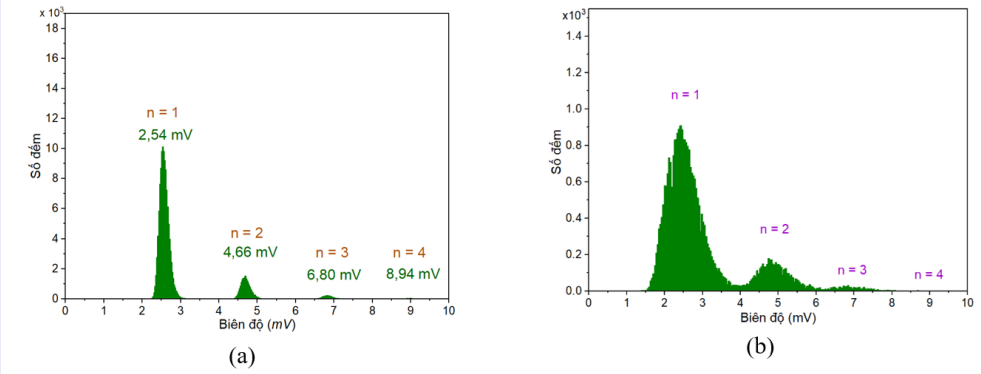
của mô hình đáp ứng SiPM - một yếu tố then chốt để triển khai các thuật toán phân biệt dạng xung (PSD) nơtron/gamma hiệu quả.

Kết quả mô phỏng nhiễu xuyên quang

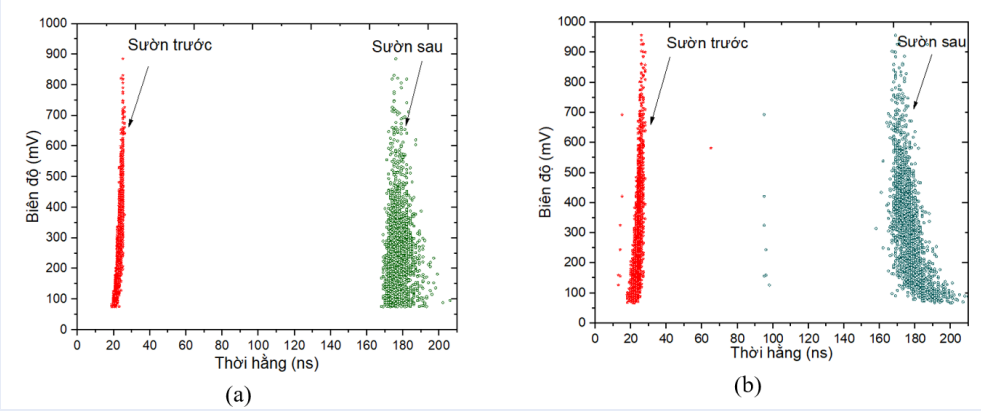
Hiệu ứng nhiễu xuyên quang được khảo sát với xác suất thiết lập 15%, tương ứng với thông số kỹ thuật của dòng SiPM AFBR-S4N44P163. Phổ biên độ mô phỏng (Hình 6a) tái hiện rõ cấu trúc đa đỉnh đặc trưng của SiPM. Đỉnh chính tại 2,54 mV tương ứng với đáp ứng đơn quang điện tử (1 p.e.), trong khi các đỉnh bậc cao ($n = 2, 3, 4$) phản ánh chính xác các sự kiện nhiễu kích hoạt pixel lân cận. So với dữ liệu thực nghiệm (Hình 6b), cấu trúc phân bố có sự tương đồng cao. Độ rộng phổ thực nghiệm lớn hơn được xác định là do tác động của nhiễu điện tử nền - yếu tố chưa được tích hợp hoàn toàn vào mô hình mô phỏng. Kết quả này cho thấy khả năng tái tạo chính xác các tham số nội tại then chốt ảnh hưởng đến độ phân giải của hệ đo.

Sự tương quan giữa các đặc trưng thời gian và biên độ xung đối với nguồn ^{60}Co được thể hiện tại Hình 7. Kết quả cho thấy sự đồng nhất về giá trị trung bình giữa mô phỏng và thực nghiệm, với thời gian sườn trước và sườn sau lần lượt xấp xỉ 24 ns và 174 ns. Tại vùng biên độ thấp, dữ liệu thực nghiệm có độ phân tán rộng hơn và thời gian sườn sau có xu hướng gia tăng. Hiện tượng này là hệ quả của nhiễu điện tử nền và chồng chập xung (pulse pile-up) trong điều kiện đo thực tế, gây biến dạng tín hiệu ở mức năng lượng thấp.

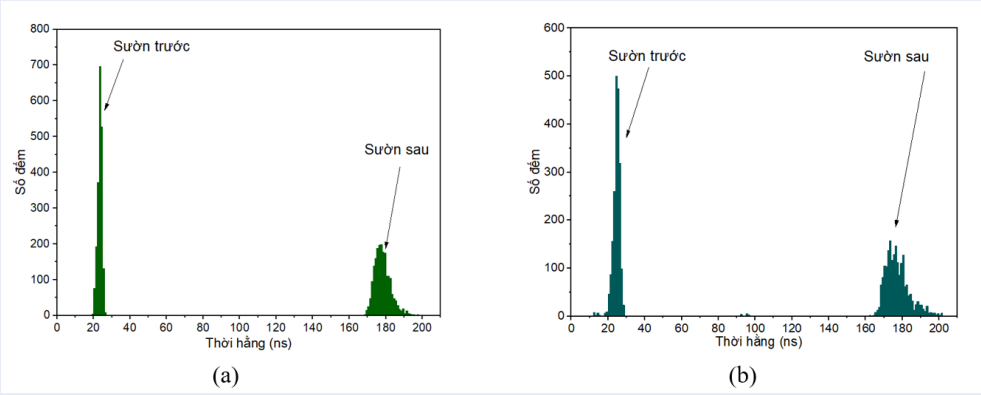
Số liệu thống kê tại Hình 8 củng cố độ tin cậy của mô hình thông qua sự phù hợp của các phân bố thời hằng sườn lên và sườn xuống. Mặc dù tồn tại sai khác về độ lệch chuẩn do các yếu tố ngẫu nhiên trong thực nghiệm, sự tương đồng về giá trị trung bình khẳng định khả năng của mô hình trong việc tái tạo các đặc trưng động học cốt yếu của đầu dò.



Hình 6: Đánh giá nhiễu xuyên quang trên SiPM: (a) Mô phỏng; (b) Thực nghiệm. [Nguồn: tác giả].



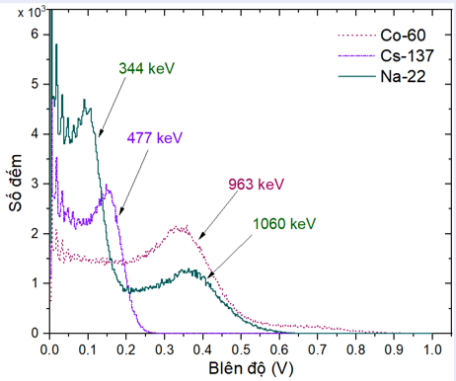
Hình 7: Phân bố đặc trưng thời gian của xung: (a) Mô phỏng; (b) Thực nghiệm. [Nguồn: tác giả].



Hình 8: Phân bố thống kê thời hằng sườn lên và sườn xuống của tín hiệu: (a) Kết quả mô phỏng; (b) Số liệu thực nghiệm. [Nguồn: tác giả].

Đáp ứng biên độ mô phỏng

Khả năng tái tạo quá trình tương tác vật lý của mô hình được đánh giá qua phổ biên độ xung với các nguồn chuẩn ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na, thu được trên Hình 9. Kết quả cho thấy các cấu trúc bờ Compton (Compton edge) đặc trưng được mô phỏng với độ chính xác cao. Cụ thể, phổ ^{22}Na xác định rõ vị trí bờ tán xạ đơn tại 477 keV. Đối với nguồn ^{22}Na, mô hình phân tách thành công hai bờ Compton tại 344 keV và 1060 keV, tương ứng với các mức năng lượng gamma đặc trưng của nguồn. Phổ ^{60}Co thể hiện vùng bờ Compton mở rộng quanh 963 keV, phản ánh chính xác hiệu ứng chồng chập các bờ tán xạ từ hai mức năng lượng gamma kế cận (1170 keV và 1330 keV). Việc tái tạo chi tiết các cấu trúc phổ này không chỉ khẳng định độ tin cậy của mô hình trong mô phỏng tán xạ Compton mà còn là tiền đề quan trọng cho việc hiệu chuẩn năng lượng và tối ưu hóa thiết kế hệ đầu dò.



Hình 9: Đối sánh phổ biên độ xung mô phỏng của mô hình đầu dò với các nguồn chuẩn ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na. [Nguồn: tác giả].

KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và kiểm chứng mô hình tính toán hiệu năng cao cho hệ đầu dò nhấp nháy EJ-276 kết hợp SiPM trong môi trường Geant4. Bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận vĩ mô để mô tả đáp ứng tổng thể thay cho mô phỏng chi tiết từng pixel, mô hình đã tối ưu hóa đáng kể tài nguyên và thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết. Sự tương quan chặt chẽ giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm về đặc trưng động học xung cũng như phổ năng lượng đã xác thực độ tin cậy của phương pháp đề xuất. Kết quả này không chỉ khẳng định khả năng tái tạo các quá trình tương tác vật lý và đáp ứng điện tử của hệ đo, mà còn tạo tiền đề khoa học quan trọng cho việc thiết kế, tối ưu hóa các hệ phổ kế bức xạ hỗn hợp thế hệ mới.

Trong giai đoạn tiếp theo, mô hình sẽ được hoàn thiện thông qua việc tích hợp các tham số biến biến thiên theo môi trường như nhiệt độ vận hành, cùng các hiệu ứng nhiễu điện tử nền và xung chậm để nâng cao năng lực dự báo trong các điều kiện đo đạc thực tế phức tạp.

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

SiPM: Silicon photomultiplier.
PMT: Photomultiplier tubes.
PDE: Photon detection efficiency.
SPAD: Single-photon avalanche diodes.
PSD: Pulse shape discrimination.
TIA: Transimpedance amplifier.
DCR: Dark count rate.
GBWP: Gain bandwidth product.
PET: Positron emission tomography.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Các tác giả đồng ý không có bất kỳ xung đột lợi ích nào liên quan đến các kết quả đã công bố.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Phan Văn Chuân thực hiện xây dựng mô hình, mô phỏng đầu dò, thu thập số liệu mô phỏng, số liệu thực nghiệm, viết bản thảo và hoàn chỉnh bản thảo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Mihai C, Pascovici G, Ciocan G, Costache C, Karayonchev V, Lungu A, et al. Development of large area Silicon Photomultipliers arrays for -ray spectroscopy applications. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Detect Assoc Equip. 2020;953. Available from: https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163263.
2. Acerbi F, Merzi S, Gola A. Position-Sensitive Silicon Photomultiplier Arrays with Large-Area and Sub-Millimeter Resolution. Sensors (Basel). 2024;24(14):4507. Available from: https://doi.org/10.3390/s24144507.
3. Duara A, Lapington JS, Williams JO, Leach SA, Ross D, Rawlins T. Experimental and extraction procedure for the electrical characterisation of silicon photomultiplier detectors. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Nuclear Instruments; Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020;979. Available from: https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164483.
4. Francesco AD. A Comprehensive Survey of Readout Strategies for SiPMs Used in Nuclear Imaging Systems: Balancing Accuracy and Complexity. Journal of Imaging. 2023;8(7):266.
5. Neacşu C, TurturicA, Borcea R, Costache C, LicR, Marginean N, et al. Development of a plastic scintillator based and SiPM readout detector for high-precision fast-timing measurements at rosphere array. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Nuclear Instruments; Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2024;1065. Available from: https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169495.
6. Nguyen TT, et al.. A comparison of the neutron detection efficiency and response characteristics of SiPM-based vs PMT-based organic scintillator detectors; 2024.

7. Zhang KY. Performance evaluation of SiPMs against PMTs in modern high-speed scintillation detectors for medical imaging. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2024;71(3):300–10.
8. Acerbi F, Gola S. Behavioral Model of Silicon Photo-Multipliers Suitable for Transistor-Level Circuit Simulation. Electronics (Basel). 2023;12(13):1551.
9. Liu H. Simplified linear equivalent circuit models for SiPM readout optimization. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Detect Assoc Equip. 2023;1045.
10. Gundacker S. An Experimental Validation of a SiPM SPICE Model for Neutron-Gamma Discrimination. In: {IEEE} {N}uclear {S}cience {S}ymposium and {M}edical {I}maging {C}onference ({NSS}/{MIC}); 2024.
11. Ma Y. Neutron/gamma pulse shape discrimination using short-time frequency transform and SiPM arrays. Radiation Measurements. 2025;170.
12. Klanner R. Basic electrical characteristics of SiPMs: A first-order approximation. IEEE Instrumentation {&} Measurement Magazine. 2023;26(2):15–20.
13. Ho PW. Fast simulation techniques for SiPM-based PET detectors utilizing simplified signal generation. Physics in Medicine and Biology. 2024;69(4).
14. Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, et al. Geant4—a simulation toolkit. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Nuclear Instruments; Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003;506(3):250–303. Available from: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
15. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arce P, Asai M, Aso T, et al. Recent developments in Geant4. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers. Nuclear Instruments; Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016;835:186–225. Available from: https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125.
16. Eljen Technology. EJ-276 Plastic Scintillator Datasheet. Available from: https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-270-ej-276.
17. Broadcom. AFBR-S4N44P163 4×4 NUV-HD Silicon Photo Multiplier Array. Rev C datasheet; 2016. Available from: https://docs.broadcom.com/doc/AFBR-S4N44P163-4x4-NUV-HD-Silicon-Photo-Multiplier-Array-DS.
18. Moya-Zamanillo V, Rosado J. Understanding the nonlinear response of SiPMs. Sensors (Basel). 2024;24(8):2648. Available from: https://doi.org/10.3390/s24082648.
19. Brinkmann L, Garutti E, Martens S, Schwandt J. Correcting the non-linear response of silicon photomultipliers. Sensors (Basel). 2024;24(5):1671. Available from: https://doi.org/10.3390/s24051671.
20. . Texas Instruments. LMH6629 Ultra-Low Noise, High-Speed Operational Amplifier Datasheet. Available from: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh6629.pdf.
21. Analog Devices. AD8099 Ultralow Noise, 3.8 GHz Voltage Feedback Op Amp Datasheet. Available from: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8099.pdf.

VNUHCM Journal of Advanced Research and Natural Sciences 2026,10(3):3770-3778

Open Access Full Text Article

Research Article

Modeling the electronic impulse response of SiPM-coupled EJ-276 detectors via Geant4

Phan Van Chuan*

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

Silicon Photomultipliers (SiPMs) have emerged as the optimal alternative to traditional Photomultiplier Tubes (PMTs) in modern scintillation detectors due to their high photon detection efficiency and compact design. Nevertheless, the design and optimization of SiPM-based measurement systems continue to face significant challenges in simulation, stemming from complex non-linear response characteristics and the presence of correlated noise components. Current simulation models typically oscillate between two extremes: oversimplified architectures that lead to substantial inaccuracies, or highly detailed microcell-level models that impose excessive computational overhead. This study proposes a balanced solution by developing a high-performance hybrid model for an EJ-276 plastic scintillation detector coupled with an SiPM array within the Geant4 simulation framework. The core of this methodology lies in integrating the transfer function of the equivalent electronic circuit with the statistical characteristic parameters of the SiPM, such as dark count rate, saturation effects, and optical crosstalk. The geometric configuration is detailed to include the organic scintillation block, reflective layers, and the optical transmission medium. The reliability of the model was validated through direct comparison with experimental data obtained from a measurement system utilizing the AFBR-S4N44P163 SiPM array. The results demonstrate a high degree of correlation in kinetic characteristics: the model successfully reproduced the signal pulse shape with a rise time (t_r) of 24.64 ns and a decay time (t_f) of 174 ns. Furthermore, the model accurately reflects the characteristic multi-peak structure of optical crosstalk and the positions of Compton edges resulting from interactions with standard gamma-ray sources such as ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na. With its optimized computational efficiency, this model serves as a vital tool for the analysis, evaluation, and design of next-generation mixed-field radiation spectrometers, significantly reducing empirical testing time while maintaining the necessary physical accuracy.

Key words: SiPM model, scintillation detector, scintillation detector simulation.

Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Dalat University

Correspondence

Phan Van Chuan, Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Dalat University

Email: chuanpv@dlu.edu.vn

History

- Received: 24-06-2025
- Revised: 11-05-2026
- Accepted: 11-09-2026
- Published Online: 25-09-2026

DOI : **https://doi.org/10.32508/vnuhcmjarns.v10i3.1453**

Check for updates

Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Cite this article : Chuan P V. **Modeling the electronic impulse response of SiPM-coupled EJ-276 detectors via Geant4**. *VNUHCM J. Adv. Res. Nat. Sci.* 2026; 10(3):3770-3778.