

Nghiên cứu khảo sát đặc trưng đo liều gamma của LiAlO_2

Nguyễn Thị Thu Hà*, Trịnh Văn Giáp, Bùi Đức Kỳ

Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, 179 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 27/3/2023; ngày chuyển phân biện 29/3/2023; ngày nhận phân biện 28/4/2023; ngày chấp nhận đăng 3/5/2023

Tóm tắt:

Vật liệu đo liều bức xạ đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, nhằm phát triển thành các liều kế đo tích lũy ứng dụng trong đo liều môi trường, cũng như đo liều cá nhân. Nhóm tác giả đã tiến hành các bài thực nghiệm nghiên cứu, và khảo sát đặc trưng của vật liệu LiAlO_2 ứng dụng trong đo liều. Trên cơ sở phân tích và thực nghiệm chế tạo ra LiAlO_2 đơn pha gamma, nghiên cứu này bước đầu khảo sát các đặc trưng đo liều bao gồm: giá trị phông, độ tuyến tính, độ đồng đều, độ nhạy tín hiệu nhiệt phát quang (TL), khả năng tái sử dụng/đáp ứng liều cũng như đặc trưng suy giảm tín hiệu nhiệt phát quang sau khi vật liệu LiAlO_2 được chiếu bức xạ gamma. Kết quả chỉ ra rằng, vật liệu LiAlO_2 có ngưỡng nhạy 6,09 nC, độ đồng đều 6,98%. Khảo sát dải liều 2-40 mGy cho thấy, độ tuyến tính tốt với thang giáng giữa liều đo và liều chiếu là 8,8%. Độ suy giảm tín hiệu được lưu giữ 90 ngày sau khi chiếu xạ là 6%. Kết quả các phép đo kiểm tra khả năng tái sử dụng của mẫu bột LiAlO_2 với độ lệch chuẩn của 10 phép đo là 3,63%. Giá trị phân bố các phép đo khá đồng đều, có độ nhạy hầu như không thay đổi trong quá trình sử dụng, có khả năng tái sử dụng cao. Từ những kết quả đã nghiên cứu và khảo sát có thể kết luận rằng, LiAlO_2 có khả năng ứng dụng trong đo liều bức xạ.

Từ khóa: độ suy giảm tín hiệu, độ tuyến tính, giới hạn phát hiện.

Chỉ số phân loại: 1.3, 1.4, 2.5

Study on gamma dosimetry characteristics of LiAlO_2

Thi Thu Ha Nguyen*, Van Giap Trinh, Duc Ky Bui

Institute for Nuclear Science and Technology, Vietnam Atomic Energy Institute, 179 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 27 March 2023; revised 28 April 2023; accepted 3 May 2023

Abstract:

Radiation dosimetry materials are being studied by scientists to create passive dosimeters in environment dosimetry as well as personal dosimetry. The research team conducted experimental studies and investigated the characteristics of LiAlO_2 material for dosimetry applications. On the basis of analysis and synthesis of LiAlO_2 , preliminary investigation of dosimetry characteristics, including background, linearity, uniformity, the sensitivity of thermoluminescent (TL) signal, reusability, dose-response and fading of TL signals after LiAlO_2 being irradiated by gamma. The results show that LiAlO_2 has a detection limit of 6.09 nC, uniformity of 6.98%. The investigation of the 2-40 mGy dose range showed good linearity, with a fluctuation of 8.8% between the measured dose and the irradiation dose. The fading of the TL signal maintained 90 days after being irradiated was 6%. The results of the tests measuring the reusability of the LiAlO_2 powder sample show a standard deviation of 3.63% from 10 measurements. The distribution of the measurements is quite uniform, and the sensitivity remains almost unchanged during use, indicating a high reusability. The results of the research and investigation lead to the conclusion that LiAlO_2 has the potential for application in radiation dose measurement.

Keywords: detection limit, fading, linearity.

Classification numbers: 1.3, 1.4, 2.5

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

1. Mở đầu

Đo liều bức xạ đã được các tác giả nghiên cứu, khảo sát và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Ví dụ, trong nghiên cứu vật liệu, trong đo liều cá nhân, trong đo liều môi trường. Đo liều bức xạ là phương pháp tin cậy được dùng để đánh giá liều bức xạ tích lũy theo thời gian của các nhân viên bức xạ. Phương pháp đo liều bằng nhiệt phát quang (TLD) ra đời cùng năm Roentgen C.W phát hiện ra tia X (1895). Tuy nhiên, mãi đến năm 1953, sau khi Daniels và cộng sự tiến hành thử nghiệm và ứng dụng TLD thành công trong lĩnh vực y tế tại Trường Đại học Wisconsin, thì phương pháp TLD mới thực sự được chấp nhận sử dụng như một phương pháp đo liều bức xạ. Đầu tiên, người ta đã sử dụng vật liệu LiF trong phép chẩn đoán bằng X-quang, các mẫu LiF được đặt trên bệnh nhân, sau đó nhận lại mẫu đã chiếu xạ. Liều hấp thụ bức xạ tia X trong vật liệu được xác định bằng cách đo tín hiệu nhiệt phát quang (TL) các mẫu đã chiếu xạ bởi nhóm các tác giả H. Teng và cs (2010) [1], M. Martini và cs (1997) [2], M.S. Akselrod và cs (2000) [3]. Đến nay, TL là một trong những hiện tượng đã và đang thu được nhiều thành công ứng dụng trong thực tiễn, như nghiên cứu cấu trúc khuyết tật của vật liệu, xác định tuổi và đo liều bức xạ [4-7].

Một vài nghiên cứu về các tính chất nhiệt phát quang của lithium aluminate cũng được báo cáo. Tác giả B. Dhabekar và cs (2008b) [8] đã nghiên cứu và khảo sát các đường cong nhiệt phát quang tích phân của hai vật liệu LiAlO_2 : Mn và LiAlO_2 : Ce. Vào năm 2010, nhóm tác giả H. Teng và cs (2010) [1] cũng nghiên cứu các tính chất TL của vật liệu LiAlO_2 : Mn. Sau đó, năm 2014 nhóm tác giả J.I. Lee và cs (2012) [9] đã nghiên cứu, khảo sát đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu LiAlO_2 . Nhóm tác giả M. Sadel và cs (2014) [10] đã báo cáo hiệu suất của vật liệu LiAlO_2 đối với proton. Các nhóm tác giả khác cũng chủ yếu tập trung vào nghiên cứu, khảo sát đặc trưng phát quang chung của lithium aluminate [11-13]. Ngoài ra, J.I. Lee và cs (2013) [11] cũng nghiên cứu các tham số động học nhiệt phát quang và quang phát quang của vật liệu LiAlO_2 .

Vật liệu đo liều LiAlO_2 dạng bột đơn pha gamma đã được nhóm tác giả chế tạo thành công tại phòng thí nghiệm thuộc Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân. Bảng 1 tóm tắt một số tính chất của vật liệu LiAlO_2 . Trong bài báo này, nhóm tác giả đã tiến hành thực nghiệm khảo sát các đặc trưng đo liều của vật liệu LiAlO_2 sau khi được chế tạo.

Bảng 1. Tính chất của vật liệu LiAlO_2 .

Khối lượng phân tử	65,92 g·mol ⁻¹
Công thức hóa học	LiAlO_2
Đặc tính nhận dạng	Bột tinh thể trắng
Mật độ pha γ - LiAlO_2	2,615 g/cm ³
Mật độ pha β - LiAlO_2	2,61 g/cm ³
Mật độ pha α - LiAlO_2	3,401 g/cm ³
Nhiệt độ nóng chảy	1,625°C
Độ hòa tan	Không hòa tan trong nước

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

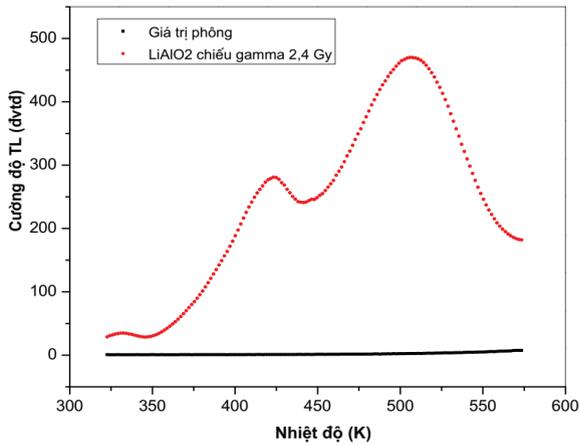
Nhóm tác giả đã tiến hành thực nghiệm khảo sát đặc trưng đo liều của vật liệu LiAlO_2 tại Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân. Mẫu sau khi chế tạo được chiếu bức xạ gamma và đọc kết quả liều trên thiết bị Harshaw 4000 thuộc Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân. Nguồn bức xạ hạt nhân được lựa chọn là nguồn phóng xạ ¹³⁷Cs. Đây là nguồn phóng xạ phát gamma có đỉnh năng lượng 0,661 MeV, hoạt độ ~1.1Ci vào ngày 13/04/2020, chu kỳ bán hủy tương đối dài (30 năm), chứng tỏ nguồn có khả năng cung cấp chùm tia gamma có cường độ ổn định trong thời gian làm thực nghiệm.

Tín hiệu nhiệt phát quang được thu nhận dựa trên quá trình đốt nóng vật liệu từ nhiệt độ phòng đến 400°C. Các bộ phận chính của hệ đo TL gồm: bộ phận gia nhiệt, bộ phận thu gom tín hiệu, bộ phận xử lý và ghi nhận tín hiệu. Hầu hết các phòng thí nghiệm trên thế giới hiện đang sử dụng các máy đọc TL thương phẩm. Tuy nhiên, tùy từng điều kiện và mục đích sử dụng mà các phòng thí nghiệm lựa chọn cho mình loại máy đọc phù hợp như bán tự động hoặc tự động. Loại máy đọc tự động có thể đo nhanh với số lượng mẫu lớn và hạn chế sự can thiệp của con người, thường được sử dụng cho mục đích đo liều. Mặt khác, loại bán tự động phát huy tốt hơn cho mục đích nghiên cứu vì có thể dễ dàng thay đổi các tham số thực nghiệm như: tốc độ gia nhiệt, các giới hạn tích phân đường cong nhiệt phát quang [13, 14].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phong và giới hạn phát hiện của LiAlO_2

LiAlO_2 đã được khử hết tín hiệu về giá trị nội tại của LiAlO_2 bằng cách nung ở nhiệt độ 500°C trong thời gian 30 phút và lưu trong bình hút ẩm. Sau đó, tiến hành đọc trên thiết bị Harshaw (thực hiện 10 phép đo trên lô mẫu đã được khử tín hiệu), kết quả phong trung bình thu được sau 10 phép đo là 23,36 nC, độ lệch chuẩn sau 10 phép đo phong của vật liệu LiAlO_2 là $\sigma=2,03$ nC. Giá trị giới hạn phát hiện được đánh giá bằng 3 lần độ lệch chuẩn và có giá trị là: $DL=3 \times \sigma = 6,09$ nC. Hình 1 mô tả đường cong TL của vật liệu trước và sau khi chiếu bức xạ gamma 2,4 Gy.



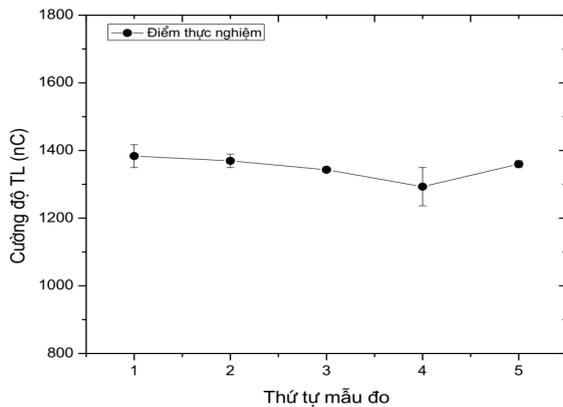
Hình 1. Đường cong tín hiệu nhiệt phát quang của LiAlO₂ trước và sau khi chiếu bức xạ gamma 2,4 Gy.

3.2. Đánh giá sự đồng đều của vật liệu LiAlO₂ sau khi được chế tạo

Một thông số quan trọng đầu tiên cần được xem xét, đánh giá đối với vật liệu được chế tạo là sự đồng đều của tinh thể vật liệu LiAlO₂ sau khi được chế tạo. Độ đồng nhất của một lô mẫu được thực hiện bằng cách đánh giá độ nhạy nhiệt phát quang dựa trên 5 phép đo tương ứng ngẫu nhiên của lô mẫu được chế tạo. Quá trình đánh giá độ lệch chuẩn được lấy ngẫu nhiên 5 phép đo trong cùng một lô mẫu được chế tạo, cùng một liều chiếu gamma 4 mGy, giữ nguyên các thông số của máy đọc. Hình 2 trình bày kết quả kiểm tra sự đồng đều của lô mẫu với độ lệch chuẩn 2,58%. Độ đồng đều được tính theo công thức sau:

$$H(\%) = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{min}} \times 100$$

Với D_{max} là giá trị liều đo cao nhất và D_{min} là giá trị liều đo thấp nhất của 5 phép đo. Kết quả tính được độ đồng đều là 6,98%.



Hình 2. Kết quả kiểm tra sự đồng đều của lô vật liệu LiAlO₂ được chế tạo bằng phương pháp sol-gel kết hợp với EDTA sau khi chiếu bức xạ gamma 4 mGy, tốc độ gia nhiệt 5°C/s.

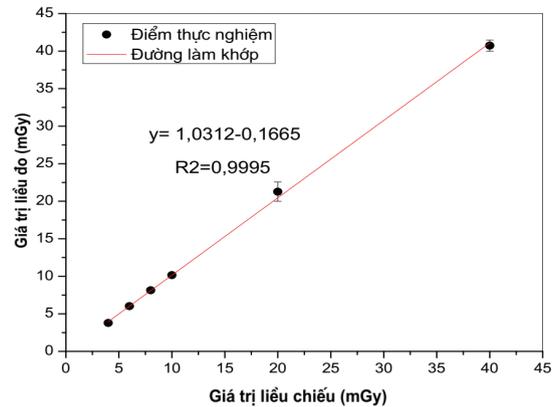
3.3. Khảo sát đặc trưng tuyến tính

Để tiến hành khảo sát đặc trưng tuyến tính của vật liệu LiAlO₂, nhóm tác giả đã chia vật liệu sau khi chế tạo thành sáu nhóm, vật liệu được nung khử tín hiệu và thực hiện chiếu xạ gamma với liều chiếu tương ứng: 4, 6, 8, 10, 20 và 40 mGy, đọc kết quả trên thiết bị Harshow 4000. Sự thay đổi của giá trị liều đọc đối với giá trị liều chiếu thực (r_i) được đánh giá theo công thức:

$$r_i = \frac{D_r \pm a}{D_c}$$

trong đó, D_r là giá trị liều đọc lấy trung bình, D_c là giá trị liều chiếu, a là một nửa giá trị khoảng tin cậy.

Hình 3 đánh giá số liệu đặc trưng tuyến tính của vật liệu LiAlO₂.



Hình 3. Đánh giá đặc trưng tuyến tính của LiAlO₂ trong dải liều 4-40 mGy.

Hình 3 mô tả đặc trưng tuyến tính của vật liệu LiAlO₂ đối với dải liều chiếu 4-40 mGy cho thấy, liều đọc thấp hơn 8,8% so với liều chiếu và điều này thỏa mãn theo IEC-62387:2012 là 11%.

3.4. Khảo sát đặc trưng tái sử dụng của vật liệu LiAlO₂

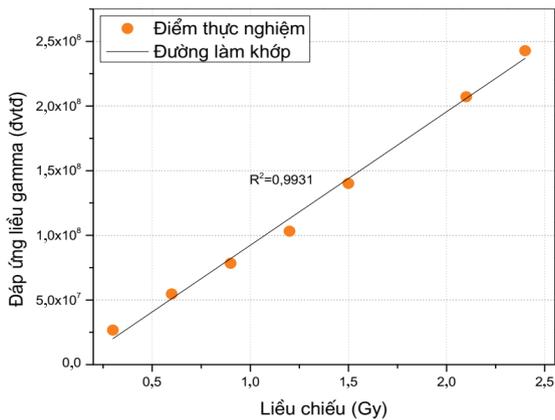
Để kiểm tra khả năng tái sử dụng của vật liệu LiAlO₂, nhóm tác giả đã thực hiện lặp lại 10 chu trình thực hiện giống nhau của một mẫu vật liệu LiAlO₂, bao gồm các bước: xử lý nhiệt, chiếu bức xạ gamma và đọc liều. Bảng 2 trình bày kết quả kiểm tra đặc trưng tái sử dụng của vật liệu LiAlO₂. Kết quả độ lệch chuẩn của 10 phép đo liều là 3,63%, giá trị phân bố các phép đo liều khá đồng đều. Điều này chứng tỏ vật liệu TL LiAlO₂ được chế tạo có độ nhạy khá ổn định trong quá trình sử dụng, có khả năng tái sử dụng cao.

Bảng 2. Kết quả đánh giá khả năng tái sử dụng của vật liệu LiAlO₂.

Lần đọc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TL (10 ³ nC)	2,47	2,39	2,22	2,46	2,50	2,36	2,41	2,52	2,44	2,49
Giá trị trung bình	2,42 × 10 ³ (nC)									
Độ lệch chuẩn	3,63%									

3.5. Khảo sát đặc trưng đáp ứng liều của $LiAlO_2$ khi được chiếu bức xạ gamma

Một đặc trưng quan trọng, cần thiết được đánh giá trong ứng dụng đo liều là đặc trưng đáp ứng liều của vật liệu được chế tạo trong khoảng liều quan tâm. Đường cong đáp ứng liều mô tả mối quan hệ giữa cường độ nhiệt phát quang và liều chiếu bức xạ. Để khảo sát đặc trưng đáp ứng liều của vật liệu $LiAlO_2$, nhóm tác giả đã tiến hành chiếu bức xạ gamma với các giá trị liều chiếu khác nhau đối với vật liệu $LiAlO_2$. Hình 4 mô tả đường đáp ứng liều của vật liệu $LiAlO_2$ sau khi chiếu bức xạ gamma với dải liều 0,3-2,4 Gy. Trên đồ thị, chấm tròn là điểm thực nghiệm tại các giá trị liều chiếu khác nhau còn đường nét liền là đường làm khớp.

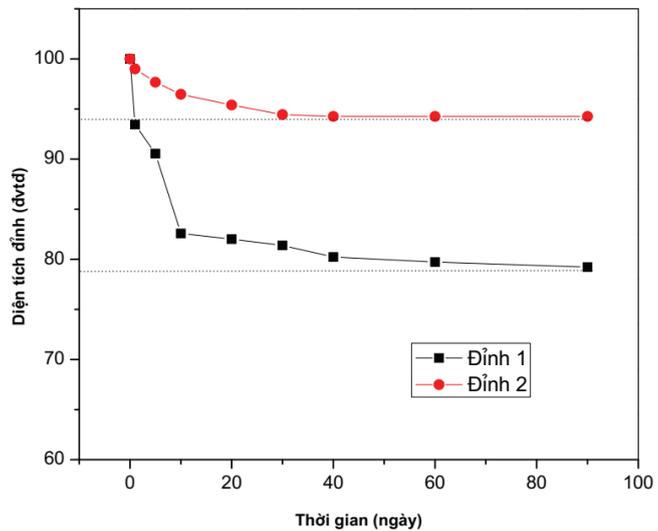
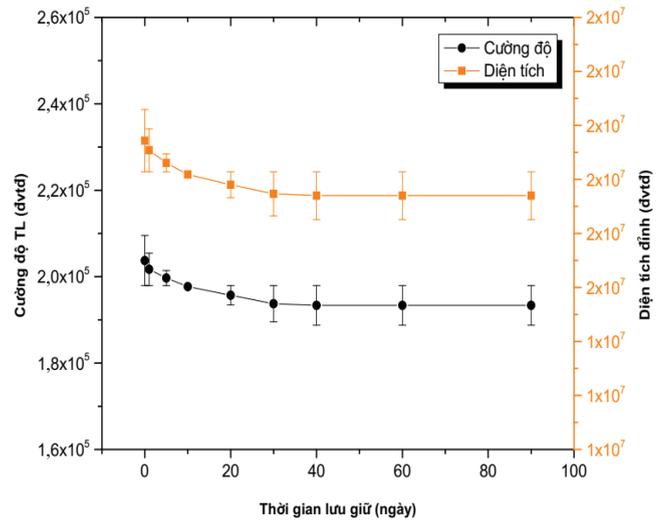


Hình 4. Đặc trưng đáp ứng liều gamma của vật liệu $LiAlO_2$.

Kết quả hình 4 cho thấy, vật liệu $LiAlO_2$ đáp ứng tốt trong khoảng liều khảo sát từ 0,3-2,4 Gy, điều này chứng tỏ vật liệu có khả năng áp dụng trong đo liều bức xạ.

3.6. Khảo sát sự suy giảm tín hiệu nhiệt phát quang của $LiAlO_2$

Sự suy giảm của tín hiệu TL hay còn gọi là hiệu ứng fading là một thông số rất quan trọng của vật liệu đo liều, thông số này đánh giá khả năng lưu trữ thông tin theo thời gian của liều kế. Để khảo sát sự suy giảm tín hiệu TL của vật liệu $LiAlO_2$, nhóm tác giả đã chiếu xạ tia gamma với cùng một liều chiếu 0,3 Gy từ nguồn Cs-137. Sau khi chiếu xạ, vật liệu $LiAlO_2$ được tiến hành đọc liều tại các thời gian lưu mẫu khác nhau. Sau 5 ngày chiếu xạ gamma, tín hiệu nhiệt phát quang tại đỉnh đo liều (đỉnh 2) giảm khoảng 3%. Sau 10 ngày chiếu xạ gamma tín hiệu TL giảm khoảng 1,2%. Sau 30 ngày chiếu xạ tia gamma, tín hiệu TL của vật liệu $LiAlO_2$ giảm khoảng 6%. Sau 60 ngày và 90 ngày chiếu xạ tia gamma thì tín hiệu TL gần như là ổn định hay giảm không đáng kể. Hình 5 trình bày sự suy giảm tín hiệu TL theo thời gian của vật liệu $LiAlO_2$ sau khi được chiếu xạ tia gamma.

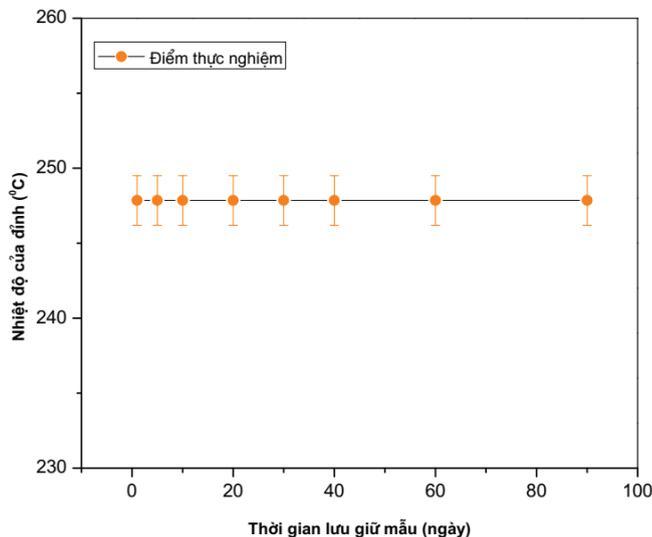


Hình 5. Khảo sát sự suy giảm tín hiệu nhiệt phát quang theo thời gian của $LiAlO_2$ sau khi chiếu xạ tia gamma.

Hiệu ứng fading hay sự suy giảm tín hiệu TL theo thời gian là một thông số để hiệu chỉnh chính xác kết quả đo liều. So sánh các kết quả tổng hợp của các nhóm tác giả B. Dhabekar và cs (2008a) [6], W. Pan và cs (2008) [7], R. Visocekas (1985) [14] về sự ảnh hưởng suy giảm tín hiệu vì nhiệt của một số vật liệu TL phổ biến đang sử dụng trong đo liều, thì hiệu ứng fading của vật liệu $LiAlO_2$ do chúng tôi chế tạo là chấp nhận được. Sự dịch chuyển vị trí đỉnh theo thời gian lưu giữ là rất quan trọng để biết bản chất của sự phân bố bẫy. Giảm độ vị trí nhiệt độ đỉnh đo liều của vật liệu $LiAlO_2$ theo thời gian lưu trữ mẫu được trình bày trong hình 6 và quan sát thấy rằng, vị trí cực đại của đỉnh gần như là không đổi theo thời gian. Bảng 3 dẫn chứng chỉ số suy giảm tín hiệu TL của một số vật liệu phổ biến đang được sử dụng trong đo liều:

Bảng 3. Suy giảm tín hiệu nhiệt phát quang của một số vật liệu khác nhau sử dụng trong đo liều bức xạ và vật liệu do chúng tôi chế tạo.

STT	Vật liệu nhiệt phát quang	Suy giảm tín hiệu nhiệt phát quang
1	LiF	5 đến 10%/năm
2	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	2,5%/tháng
3	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	4%/tháng
4	CaSO ₄ :Dy	1 đến 5%/tháng
5	CaSO ₄ :Mn	10%/tháng
6	CaF ₂ :Dy	25%/tháng
7	CaF ₂ :Mn	7%/ngày
8	LiAlO ₂	2 đến 6%/3 tháng



Hình 6. Sự dịch chuyển vị trí đỉnh đo liều của vật liệu LiAlO₂ được chiếu bức xạ gamma theo thời gian.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã khảo sát các đặc trưng đo liều của LiAlO₂ với giá trị phong và giới hạn ghi nhận lần lượt là 23,36 và 6,09 nC. Độ đồng đều của vật liệu đo liều LiAlO₂ là 6,98%, giá trị thẳng giáng giữa dải liều chiếu 4-40 mGy với các giá trị đọc liều trên Harshow 4000 là 8,8%, điều này thỏa mãn theo IEC-62387 là 11%. Kết quả các phép đo kiểm tra khả năng tái sử dụng của mẫu bột LiAlO₂ với độ lệch chuẩn của 10 phép đọc liều là 3,63%, có độ nhạy hầu như không thay đổi trong quá trình sử dụng, có khả năng tái sử dụng cao. Tín hiệu TL của vật liệu LiAlO₂ giảm khoảng 6% sau 90 ngày. Từ những kết quả đã nghiên cứu và khảo sát có thể kết luận rằng LiAlO₂ có khả năng ứng dụng trong đo liều bức xạ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H. Teng, S. Zhou, H. Lin, et al. (2010), "Growth and characterization of high-quality Mn-doped LiAlO₂ single crystal", *Chin. Opt. Lett.*, **8**, pp.414-417.

[2] M. Martini, F. Meinardi (1997), "Thermally stimulated luminescence: New perspectives in the study of defects in solids", *La Rivista del Nuovo Cimento*, **20**, pp.1-71, DOI: 10.1007/BF02897907.

[3] M.S. Akselrod, N.A. Larsen, S.W.S.M. Keever (2000), "A procedure for the distinction between static and dynamic radiation exposures of personal radiation badges using pulsed optically stimulated luminescence", *Radiat. Meas.*, **32(3)**, pp.215-225, DOI: 10.1016/S1350-4487(00)00040-8.

[4] A.K. Fischer (1977), "Atmospheric pressure synthesis for β-LiAlO₂", *Inorganic Chemistry*, **16(4)**, DOI: 10.1107/S0365110X65003511.

[5] J. Lin, Z. Wen, X. Xu, et al. (2010), "Processing and microstructure of γ-LiAlO₂ ceramics", *Ceramics International*, **36(7)**, pp.2221-2225, DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.03.032.

[6] B. Dhabekar, E.A. Raja, S. Menon, et al. (2008a), "Identification of defect centres using TSL, PL, OSL and ESR studies in LiAlO₂ based phosphors", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **41(11)**, pp.115414-115416, DOI: 10.1088/0022-3727/41/11/115414.

[7] W. Pan, G. Ning, Y. Lin, et al. (2008), "Sol-gel processed Ce³⁺, Tb³⁺ codoped white emitting phosphors in Sr₂Al₂SiO₇", *Journal of Rare Earths*, **26(2)**, pp.207-210, DOI: 10.1016/S1002-0721(08)60066-6.

[8] B. Dhabekar, E.A. Raja, S. Menon, et al. (2008b), "ESR, PL and TL studies of LiAlO₂: Mn/Ce phosphor", *Radiat. Meas.*, **43(2-6)**, pp.291-294, DOI: 10.1016/j.radmeas.2007.11.054.

[9] J.I. Lee, A.S. Pradhan, J.L. Kim, et al. (2012), "Preliminary study on development and characterization of high sensitivity LiAlO₂ optically stimulated luminescence material", *Radiat. Meas.*, **47(9)**, pp.837-840, DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.01.007.

[10] M. Sadel, P. Bilski, J. Swakon (2014), "Relative TL and OSL efficiency to protons of various dosimetric materials", *Radiat. Prot. Dosim.*, **161(1-4)**, pp.112-115, DOI: 10.1093/rpd/nct217.

[11] J.I. Lee, A.S. Pradhan, J.L. Kim, et al. (2013), "Characteristics of LiAlO₂- radioluminescence and optically stimulated luminescence", *Radiat. Meas.*, **56**, pp.217-222, DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.01.066.

[12] L. Brian, A.M. Miller, L.A. Huston, et al. (2000), *Dosimetry Measurement*, CRC Press, pp.1820-1824.

[13] J.V. Dam, G. Marinello (2006), *Methods for In Vivo Dosimetry in External Radiotherapy*, European Society for Radiation Oncology, Brussels.

[14] R. Visocekas (1985), "Tunneling radiative recombination in labradorite: Its association with anomalous fading of thermoluminescence", *Nucl. Tracks*, **10(4-6)**, pp.521-529, DOI: 10.1016/0735-245X(85)90053-5.