

COMBUSTION SYNTHESIS AND OPTICAL PROPERTIES OF Eu^{3+} , Al^{3+} CO-DOPED CeO_2 PHOSPHOR

Nguyen Thi Khanh Linh^{1,2}, Nguyen Van Hai¹, Le Tien Ha³, Hoang Nhu Van^{2*}

¹Hanoi National University of Education, ²Phenikaa University, ³TNU - University of Sciences

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	26/02/2024	This paper reports the effect of Al^{3+} content on luminescence properties of $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$, Al^{3+} phosphor was successfully synthesized using solution combustion followed by annealed at high temperature. The crystal structure, chemical element composition, morphology, and photoluminescence properties of the phosphors were investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and luminescence analysis. The XRD results confirmed the formation of the single-phase cubic CeO_2 with high crystallinity. SEM analysis exhibited cubic-like particle morphology with an average size of about 30 nm. Under 393 nm excitation, the phosphors emitted intense orange-red emissions at 595, 615/631, 650, and 700 nm, corresponding to the $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$) transitions of Eu^{3+} , respectively. Significantly, the orange-red emission intensity of the Al^{3+} doped sample was significantly enhanced compared to the un-doped sample. This phenomenon is due to the presence of Al^{3+} on $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$, Al^{3+} phosphor formed oxygen vacancy and destroyed the symmetry of the crystal field of host lattice. These results suggested that the $\text{CeO}_2:\text{Eu}, \text{Al}$ phosphor is suitable for optoelectronic applications.
Revised:	29/5/2024	
Published:	29/5/2024	
KEYWORDS		
Combustion method		
Orange-red emission		
$\text{CeO}_2:\text{Eu}, \text{Al}$ phosphor		
Optoelectronic		
Oxygen vacancy		

TỔNG HỢP ĐỐT CHÁY VÀ TÍNH CHẤT PHÁT QUANG CỦA VẬT LIỆU Eu^{3+} , Al^{3+} ĐỒNG PHA TẠP CeO_2

Nguyễn Thị Khánh Linh^{1,2}, Nguyễn Văn Hải¹, Lê Tiến Hà³, Hoàng Như Vân^{2*}

¹Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, ²Trường Đại học Phenikaa, ³Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 26/02/2024	Bài báo này báo cáo về ảnh hưởng của nồng độ Al^{3+} đến tính chất phát quang của vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$, Al^{3+} tổng hợp bằng phương pháp đốt cháy kết hợp xử lý ở nhiệt độ cao. Cấu trúc, thành phần nguyên tố hóa học, hình thái bề mặt và tính chất huỳnh quang của vật liệu được khảo sát, sử dụng các phép phân tích nhiễu xạ tia X (XRD), phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS), và phổ phát quang. Kết quả XRD xác nhận sự hình thành đơn pha cubic của CeO_2 với độ kết tinh cao. Phân tích hình thái bề mặt cho thấy vật liệu thu được gồm các hạt hình dạng cubic với kích thước trung bình cỡ 30 nm. Dưới kích thích 393 nm, vật liệu cho phát xạ mạnh vùng màu cam-đỏ ở bước sóng 595, 615/631, 650, và 700 nm, tương ứng với các chuyển dời $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$) của ion Eu^{3+} . Đáng chú ý, cường độ phát xạ màu da cam-đỏ của vật liệu đồng pha tạp Al^{3+} tăng lên đáng kể so với mẫu không pha tạp. Hiện tượng này là do sự hiện diện của Al^{3+} trong vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$, Al^{3+} đã tạo ra các nút khuyết oxy và phá vỡ tính đối xứng trường tinh thể mạng nền. Các kết quả này chỉ ra rằng vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}, \text{Al}$ phù hợp cho các ứng dụng trong quang điện tử.
Ngày hoàn thiện: 29/5/2024	
Ngày đăng: 29/5/2024	
TỪ KHÓA	
Phương pháp đốt cháy	
Phát xạ da cam-đỏ	
Vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}, \text{Al}$	
Quang điện tử	
Khuyết oxy	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9780>

* Corresponding author. Email: van.hoangnphu@phenikaa-uni.edu.vn

1. Giới thiệu

Đèn LED phát ánh sáng trắng (WLED) có các đặc tính vượt trội như độ bền cao, tiết kiệm năng lượng, do đó nó đang được sử dụng rộng rãi trong công nghệ cũng như trong đời sống con người [1] – [3]. Các đèn WLED thương mại được chế tạo bằng cách kết hợp chip blue-LED và bột phát xạ màu vàng hoặc kết hợp giữa chip NUV với bột phát xạ màu xanh dương, xanh nước biển, và màu đỏ [3], [4]. Tuy nhiên, các hệ đèn này đang tồn tại một số nhược điểm như nhiệt độ màu cao và chỉ số hoàn màu (CRI) thấp, nguyên nhân do thiếu thị phần ánh sáng màu đỏ [5] – [7]. Do vậy, phát triển các loại vật liệu phát xạ màu đỏ mới có hiệu suất cao để nâng cao chất lượng đèn WLED là rất cần thiết.

Eu^{3+} là ion đất hiếm được sử dụng phổ biến nhất làm tâm phát quang trong vật liệu phát xạ màu đỏ. Ánh sáng phát xạ màu đỏ của Eu^{3+} có nguồn gốc từ chuyển dời lưỡng cực điện, phụ thuộc mạnh vào độ bất đối xứng của trường tinh thể mạng nền [8] – [10]. Theo đó, khi Eu^{3+} chiếm các vị trí không có tâm đối xứng trong mạng nền, dẫn đến nối lỏng tính cấm [3], [11], [12], kết quả là xác suất chuyển dời lưỡng cực điện tăng, làm tăng cường độ phát xạ màu đỏ. Dựa theo nguyên lý này, nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới đã và đang tập trung nghiên cứu sử dụng đồng pha tạp các ion có bán kính nhỏ như Al^{3+} , Li^+ , Na^+ vào mạng nền nhằm làm giảm tính đối xứng của mạng nền và tăng cường độ phát xạ màu đỏ của Eu^{3+} [13] – [15]. Sun và cộng sự [16] đã thu được kết quả tăng cường độ phát xạ màu đỏ của vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$ sử dụng đồng pha tạp Bi^{3+} , do sự hiện diện của Bi^{3+} trong mạng nền tạo nên các vị trí khuyết oxy (oxygen vacancy) dẫn đến phá vỡ tính đối xứng trong mạng nền. Sự hình thành các vị trí khuyết O dẫn đến tăng cường độ phát xạ màu đỏ của Eu^{3+} cũng được quan sát thấy trong công trình của Huang và cộng sự [17]. Trong khi đó, sự hiện diện của ion Al^{3+} khi đồng pha tạp vào vật liệu phát quang dẫn đến làm giảm tính đối xứng của mạng nền, làm tăng cường độ phát xạ màu da cam, màu đỏ của Eu^{3+} đã được quan sát thấy trong nhiều công trình trước đây [5], [14], [18] – [20]. Tuy nhiên, theo hiểu biết của chúng tôi, ảnh hưởng của hàm lượng Al^{3+} đến tính chất phát xạ màu da cam-đỏ của vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}$, Al chế tạo bằng phương pháp đốt cháy vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống.

Do vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung chế tạo và làm rõ ảnh hưởng của ion Al^{3+} đến đặc trưng phát xạ của vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}$, Al. Đặc trưng tính chất của bột phát quang $\text{CeO}_2:\text{Eu}$, Al được nghiên cứu bằng giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD), ảnh hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM), phân tích thành phần nguyên tố (EDS), và phổ quang phát quang (PL).

2. Thực nghiệm

Bột phosphor $\text{CeO}_2:\text{Eu}^{3+}$, Al^{3+} được tổng hợp bằng phương pháp đốt cháy, sử dụng tiền chất bao gồm các muối $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ và ure với độ sạch cao. Các dung dịch Ce^{3+} (0,5M), Eu^{3+} (0,1M), và Al^{3+} (0,1M) được tạo thành bằng cách hòa tan các muối ban đầu trong nước khử ion. Trong đó, nồng độ Eu^{3+} được giữ cố định là 0,5% mol, nồng độ Al^{3+} thay đổi 0, 1, 2, 3 và 4% mol so với Ce^{3+} , các mẫu được ký hiệu tương ứng như trong Bảng 1. Dung dịch hỗn hợp được trộn theo tỉ lệ đã tính toán và hòa tan trong 30 phút, với điều kiện khuấy từ ở 80 °C. Sau đó, hàm lượng 20% mol ure (so với Ce^{3+}) được thêm vào dung dịch hỗn hợp trên, khuấy từ ở 80 °C trong 4 giờ, thu được dung dịch dạng gel có độ nhớt cao. Hỗn hợp phản ứng sau đó được nung ở 400 °C trong 4 giờ để thực hiện phản ứng đốt cháy. Chất rắn sau phản ứng được ủ nhiệt ở 900 °C trong 4 giờ thu được bột phosphor $\text{CeO}_2:\text{Eu}$, Al.

Bảng 1. Ký hiệu các mẫu nghiên cứu

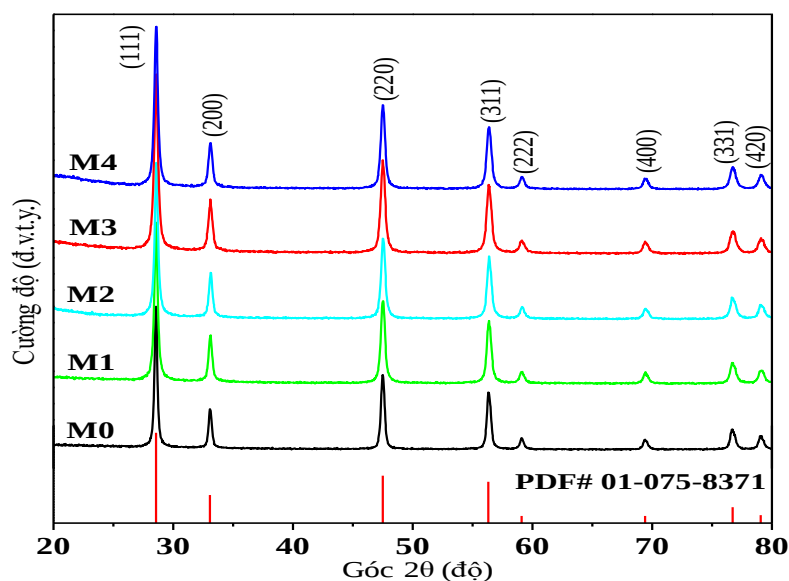
Vật liệu	Nồng độ Al^{3+} (mol %)	Ký hiệu
$\text{CeO}_2:0,5\text{Eu}^{3+}$	0	M0
$\text{CeO}_2:0,5\text{Eu}^{3+}, 1\text{Al}^{3+}$	1	M1
$\text{CeO}_2:0,5\text{Eu}^{3+}, 2\text{Al}^{3+}$	2	M2
$\text{CeO}_2:0,5\text{Eu}^{3+}, 3\text{Al}^{3+}$	3	M3
$\text{CeO}_2:0,5\text{Eu}^{3+}, 4\text{Al}^{3+}$	4	M4

Nghiên cứu cấu trúc tinh thể của vật liệu $\text{CeO}_2\text{:Eu}$, Al được thực hiện bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD), sử dụng máy D8-Advance (Bruker, $K\alpha\text{Cu} = 1,54060 \text{ \AA}$). Ảnh hình thái bề mặt của vật liệu được thực hiện trên máy HITACHI S-4800, kết hợp phép phân tích thành phần nguyên tố (EDS). Trong khi đó, phổ phát xạ của vật liệu $\text{CeO}_2\text{:Eu}$, Al được tiến hành trên hệ NANOLOG (Horiba, USA) nguồn kích thích là đèn xenon 450 W.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tính chất cấu trúc của vật liệu

Hình 1 là kết quả giản đồ nhiễu xạ XRD của mẫu M0, M1, M2, M3, và M4 chế tạo bằng phương pháp đốt cháy kết hợp ở nhiệt độ 900°C . Tất cả các đỉnh nhiễu xạ quan sát thấy trên hình 1 đều thuộc về cấu trúc trực thoi kiểu fluorite của CeO_2 (PDF # 01-075-8371) với nhóm không gian $Fm\bar{3}m$. Cấu trúc của CeO_2 bao gồm ion Ce^{4+} với số phối trí tám (tám nguyên tử O bao quanh gần nhất) và ion O^{2-} được bao quanh bởi bốn ion Ce^{4+} [5]. Hơn nữa, các mẫu đều cho thấy cường độ các đỉnh nhiễu xạ mạnh và sắc nét, chứng tỏ vật liệu thu được có độ kết tinh cao. Các mặt phản xạ điển hình của cấu trúc trực thoi CeO_2 được quan sát như (111), (200), (220), (311). Đặc biệt, các mẫu đồng pha tạp Al^{3+} (M1, M2, M3, và M4) cho thấy các đỉnh nhiễu xạ có cường độ lớn hơn với giá trị bán độ rộng là $0,3^\circ$ (mẫu M3 tương ứng với mặt phản xạ {111}), trong khi mẫu không pha tạp Al^{3+} có độ bán rộng là $0,352^\circ$, kết quả này chỉ ra rằng sự hiện diện của Al^{3+} đã làm tăng mức độ kết tinh của vật liệu. Những kết quả thu được có thể làm tăng cường độ phát xạ của vật liệu [21], [22]. Hơn nữa, các đỉnh nhiễu xạ của pha tạp chất không được quan sát thấy trong các mẫu, chứng tỏ mẫu đã được tổng hợp thành công và có độ tinh khiết cao.

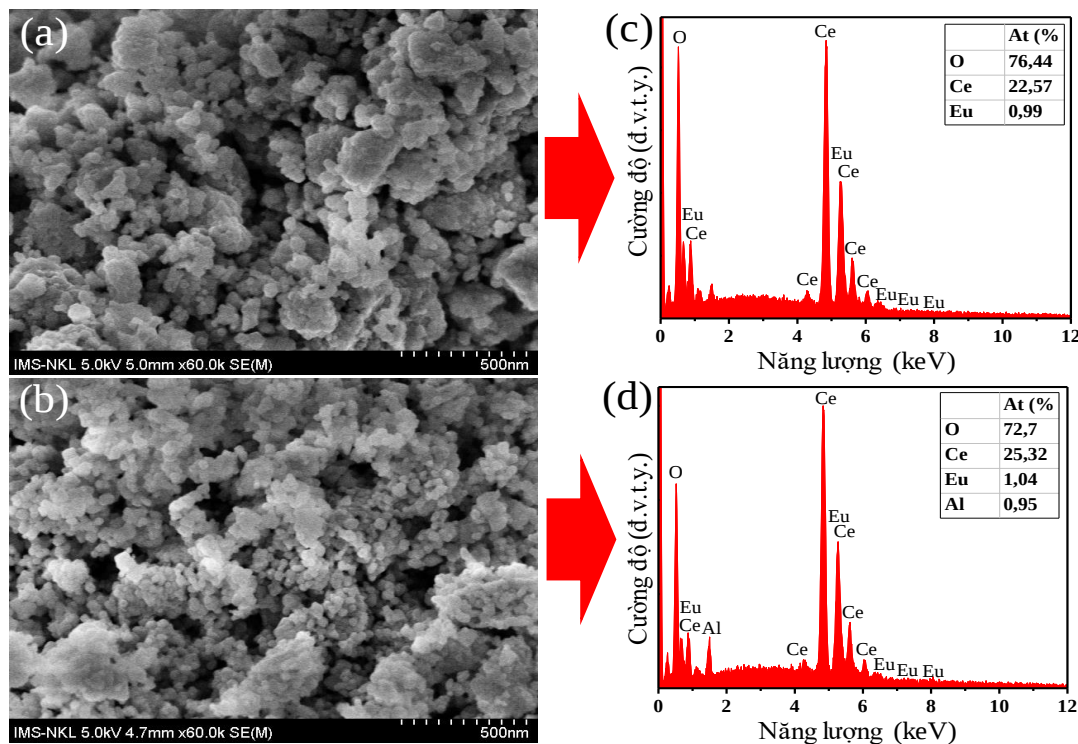


Hình 1. Giản đồ XRD của mẫu M0, M1, M2, M3, và M4

3.2. Hình thái bề mặt và thành phần nguyên tố của vật liệu

Hình 2 (a và b) hiển thị ảnh hình thái bề mặt (SEM) của mẫu M0 (a) và M3 (b). Với mẫu không pha tạp Al^{3+} , cho thấy hình thái dạng gần cầu với kích thước trung bình cỡ 30 nm . Trong khi mẫu pha tạp Al^{3+} cho thấy kích thước và hình thái thay đổi không đáng kể. Vì vậy, sự thay đổi này không phải là thông số chính ảnh hưởng đến tính chất phát quang của vật liệu. Bên cạnh đó, thành phần nguyên tố hóa học của các mẫu được hiển thị tương ứng trong hình 2c và d. Quan sát hình 2c (M0) ta thấy sự hiện diện của các nguyên tố O, Ce của mạng nền CeO_2 và nguyên tố pha tạp Eu. Trong khi hình 2d (M3) còn có sự hiện diện của nguyên tố Al^{3+} bên cạnh các nguyên

tổ O, Ce, và Eu, chứng tỏ đã thành công trong việc đưa ion Al^{3+} vào mạng nền $\text{CeO}_2\text{:Eu}$. Trong các mẫu, không quan sát thấy sự xuất hiện của các nguyên tố tạp chất, điều này chứng tỏ mẫu chế tạo được có độ sạch cao.



Hình 2. Ảnh SEM của các mẫu (a) M0, (b) M3 và phổ EDS của các mẫu (c) M0, (d) M3

3.3. Tính chất phát quang của vật liệu

Hình 3a hiển thị phổ kích thích của các mẫu tiêu biểu M0 và M3 sử dụng bước sóng phát xạ ở 631 nm. Như thể hiện trên hình 3a, vùng hấp thụ rộng từ 300 – 420 nm với đỉnh cực đại cỡ 356 nm được quy cho quá trình truyền điện tích từ O^{2-} đến $\text{Ce}^{4+}/\text{Eu}^{3+}$. Các đỉnh hấp thụ nhọn đặc trưng ở 395, 465 nm tương ứng với chuyển mức $^7\text{F}_0 - ^5\text{L}_6$ và $^7\text{F}_0 - ^5\text{D}_2$ của ion Eu^{3+} . Tuy nhiên, đỉnh hấp thụ ở 395 nm chồng chập với các dải hấp thụ truyền điện tích $\text{O}^{2-} - \text{Ce}^{4+}/\text{Eu}^{3+}$ nên cường độ đỉnh 395 nm không được quan sát rõ ràng. Đặc biệt, mẫu M3 có cường độ hấp thụ cao hơn so với mẫu không pha tạp Al^{3+} , kết quả này có thể dẫn đến sự tăng cường độ phát xạ của vật liệu. Hình 3b là phổ phát xạ của các mẫu M0, M1, M2, M3 và M4, với bước sóng kích thích 395 nm. Tất cả các mẫu cho thấy sự phát xạ mạnh vùng màu da cam-đỏ (595-615/631 nm) tương ứng với chuyển dời $^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_1/5\text{D}_0 - ^7\text{F}_2$ của ion Eu^{3+} . Trong khi đó, các mẫu còn thể hiện vùng phát xạ yếu ở vùng đỏ (590, 650, và 710 nm), tương ứng với các chuyển dời $^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_0$, $^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_3$ và $^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_4$ của ion Eu^{3+} . Cường độ phát xạ màu da cam-đỏ thay đổi theo nồng độ Al^{3+} pha tạp (Hình 3c). Trong đó, đỉnh phát xạ ở 595/631 nm đạt cực đại ứng với nồng độ 3% mol Al^{3+} pha tạp, khi nồng độ Al^{3+} lớn hơn, cường độ phát xạ của các mẫu giảm, do hiệu ứng dập tắt huỳnh quang do nồng độ [23], [24]. Đáng chú ý là, mẫu đồng pha tạp Al^{3+} có cường độ phát xạ tăng lên đáng kể so với mẫu không pha tạp. Hiện tượng tăng cường độ phát xạ do đồng pha tạp Al^{3+} vào vật liệu $\text{CeO}_2\text{:Eu}$, Al là do sự tạo thành các nút khuyết O (vacancy oxygen) và phá vỡ tính đối xứng xung quang vị trí Eu^{3+} , dẫn đến tăng cường xác suất chuyển dời phát xạ của Eu^{3+} [5], [6], [16]. Hơn nữa, hình 3d hiển thị kết quả thời gian sống của mức kích thích $^5\text{D}_0$ (Eu^{3+}) của các mẫu M0 và M3 với bước sóng kích thích 395 nm và bước sóng phát xạ 631 nm. Kết quả này giúp chúng ta hiểu

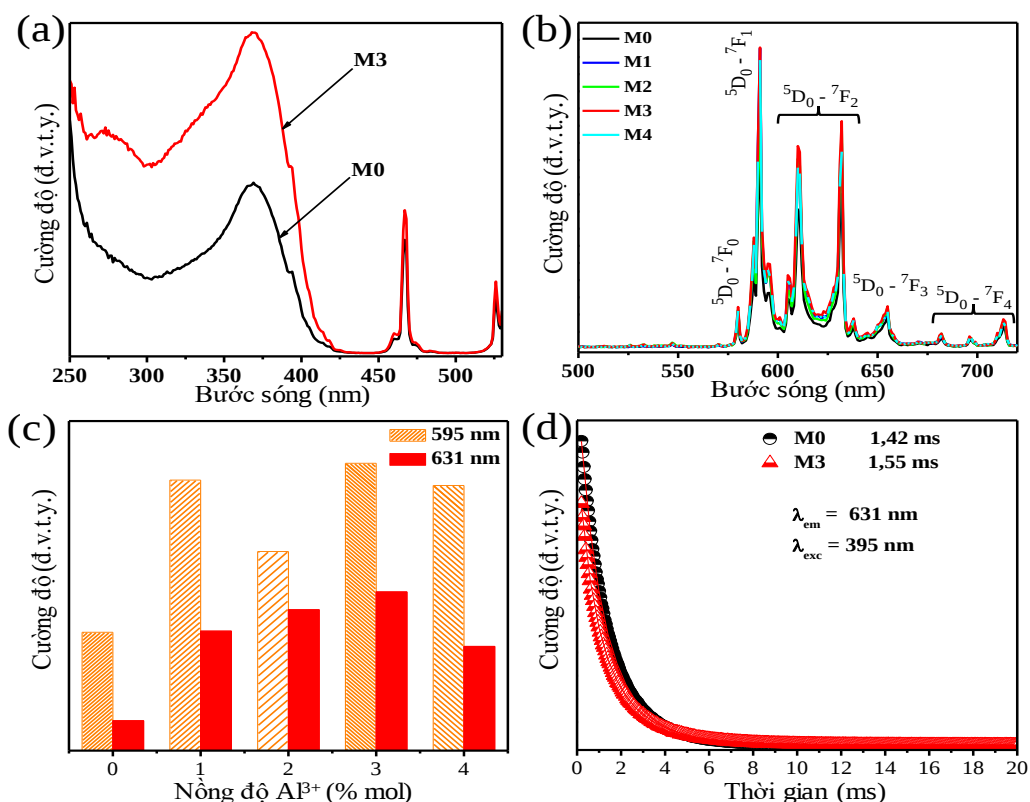
rõ hơn về cơ chế làm tăng cường độ phát xạ của vật liệu khi đồng pha tạp Al^{3+} . Thời gian sống tương đối (τ) của các mẫu phù hợp tốt nhất với quy luật hàm mũ [3]:

$$y = y_0 + A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

trong đó y là cường độ phát xạ của mẫu ở thời điểm t . y_0 là cường độ ban đầu. A_1 và A_2 là các hệ số. τ_1 là thời gian sống của tâm phát quang ở các vị trí trên bề mặt hạt hoặc vị trí biên kể. Trong khi τ_2 là thời gian sống của tâm phát quang chiếm các vị trí thay thế trong mạng nền. Các giá trị A , τ được tính toán và hiển thị trong bảng 2. Khi đó, thời gian sống trung bình của các mẫu được xác định như sau:

$$\tau = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \quad (2)$$

Theo đó, thời gian sống trung bình (τ) của các mẫu M0 và M3 được tính toán tương ứng là 1,42 ms và 1,55 ms (Bảng 2). Sự hiện diện của Al^{3+} trong hệ thống dẫn đến làm tăng độ bất đối xứng xung quanh Eu^{3+} và khả năng truyền năng lượng kích thích đến Eu^{3+} , do đó làm giảm tốc độ hồi phục không phát xạ, từ đó tăng thời gian sống của trạng thái kích thích $^5\text{D}_0$ [20]. Kết quả thời gian sống của các mẫu phù hợp với kết quả phổ phát xạ đã quan sát trên hình 3b. Vật liệu $\text{CeO}_2:\text{Eu}$, Al cho thấy cường độ phát xạ mạnh màu da cam-đỏ với thời gian sống lớn (1,55 ms), cho thấy đây là vật liệu tiềm năng cho các ứng dụng chiếu sáng rắn.



Hình 3. (a) Phổ kích thích của các mẫu điển hình M0 và M3; (b) phổ phát xạ của các mẫu M0, M1, M2, M3 và M4; (c) sự phụ thuộc cường độ phát xạ màu da cam, màu đỏ vào nồng độ Al^{3+} ; (d) thời gian sống của các mẫu M0 và M3

Bảng 2. Kết quả tính toán thời gian sống của các mẫu M0 và M3

Mẫu	A_1	τ_1	A_2	τ_2	τ (ms)
M0	344	1,77	440	0,845	1,42
M3	298	1,90	330	0,68	1,55

4. Kết luận

Vật liệu phát xạ mạnh vùng màu da cam-đỏ $\text{CeO}_2\text{:Eu}$, Al đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp đốt cháy kết hợp xử lý nhiệt ở 900 °C trong môi trường không khí. Kết quả XRD cho thấy sự hình thành cấu trúc trực thoi CeO_2 đơn pha, với độ kết tinh cao. Khi được kích thích bởi bước sóng 395 nm, vật liệu $\text{CeO}_2\text{:Eu}$, Al cho phát xạ mạnh vùng màu da cam-đỏ, với các đỉnh đặc trưng của ion Eu^{3+} ở 595, 615/631, 650, và 700 nm. Đặc biệt, mẫu đồng pha tạp Al³⁺ đã cho thấy cường độ phát xạ da cam-đỏ tăng lên đáng kể so với mẫu không pha tạp. Kết quả này là do sự hình thành các vị trí khuyết O, khi đồng pha tạp Al³⁺, dẫn đến làm giảm tính đối xứng của mạng nền, từ đó nới lỏng quy tắc cấm và làm tăng xác suất chuyển dời phát xạ của ion Eu^{3+} trong vật liệu. Các kết quả cho thấy, sử dụng ion Al³⁺ đồng pha tạp là con đường hiệu quả để làm tăng hiệu suất phát xạ của Eu^{3+} .

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành trong khuôn khổ đề tài của Bộ Giáo dục và Đào tạo, mã số: B2023-SPH-06. Các tác giả chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Sharma, A. S. Rao, and K. Kishore, "Energy transfer dynamics in thermally stable $\text{Sm}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ co-doped AEAlBS glasses for near UV triggered photonic device applications," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 580, 2022, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.121392.
- [2] X. Zhang, R. Cui, K. Guo, M. Zhang, J. Zhang, and C. Deng, "Luminescence properties of $\text{Ca}_2\text{GdNbO}_6\text{:Sm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ red phosphors with high quantum yield and excellent thermal stability for WLEDs," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 10, pp. 15402–15412, 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.01.125.
- [3] N. V. Hoang, T. T. Y. Mai, V. H. Pham, V. H. Pham, T. N. M. Vu, T. A. Pham, and D. H. Tong, "Experimental and theoretical studies of red emission enhancing mechanism in Al-doped $\text{CaMoO}_4\text{:Eu}$ phosphor," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 132, July 2022, Art. no. 112831, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112831.
- [4] Q. Chen, B. Miao, P. S. Kumar, and S. Xu, "Enhanced luminescence properties and Judd-Ofelt analysis of novel red emitting $\text{Sr}_2\text{LiScB}_4\text{O}_{10}\text{:Eu}^{3+}$ phosphors for WLED applications," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 116, April 2021, Art. no. 111093, doi: 10.1016/j.optmat.2021.111093.
- [5] V. H. Nguyen, T. H. Dinh, T. K. L. Nguyen, T. H. Bui, M. T. Nguyen, and N. V. Hoang, "Blue-excited red emission of $\text{CeO}_2\text{:Eu}^{3+}, \text{Al}^{3+}$ cubic phosphor: Influence of Al³⁺ ion doping and Judd-Ofelt theory," *J. Lumin.*, vol. 263, July 2023, Art. no. 120047, doi: 10.1016/j.jlumin.2023.120047.
- [6] V. H. Nguyen, T. K. L. Nguyen, T. H. Dinh, T. H. Bui, M. T. Nguyen, H. V. Pham, D. H. Nguyen, T. A. Vu, and N. V. Hoang, "High-efficiency energy transfer in the strong orange-red-emitting phosphor $\text{CeO}_2\text{:Sm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$," *RSC Adv.*, vol. 13, no. 49, pp. 34510–34519, 2023, doi: 10.1039/d3ra07567b.
- [7] T. Srikanth, D. V. K. Reddy, K. S. Rudramamba, S. Taherunnisa, N. M. Reddy, T. L. Viveka, and M. R. Reddy, "Red light component tuning by n-UV/blue light excitations in $\text{Sm}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ co-doped $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ glasses for W-LED applications," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 134, 2022, Art. no. 113148, doi: 10.1016/j.optmat.2022.113148.
- [8] Y. Tayal, A. S. Rao, and S. Kaur, "Photoluminescence characteristics of $\text{Sm}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ co-doped LPZABS glasses for solar cell applications," *Solid State Sci.*, vol. 125, January 2022, Art. no. 106834, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2022.106834.
- [9] P. K. Pandey, P. Dixit, V. Chauhan, and P. C. Pandey, "Luminescence properties and energy transfer studies in thermally stable $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{:Sm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ phosphor," *J. Alloys Compd.*, vol. 952, 2023, Art. no. 169911, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169911.
- [10] N. V. Hoang, D. T. Phuong, and H. V. Pham, "Red and Yellow Luminescence of $\text{Eu}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$ Co-Doped Hydroxyapatite/ β -Tricalcium Phosphate Single Phosphors Synthesized Using Coprecipitation Method," *J. Appl. Spectrosc.*, vol. 85, no. 4, pp. 738–742, 2018, doi: 10.1007/s10812-018-0713-6.
- [11] S. Jang, J. Lee, S. W. Wi, H. Lim, Y. J. Jeong, J. S. Chung, W. K. Kang, and Y. S. Lee, "Investigation on photoluminescence and Judd-Ofelt parameters in Eu ion-doped CaZrO_3 in relation to the local structural property," *J. Lumin.*, vol. 240, September 2021, doi: 10.1016/j.jlumin.2021.118433.
- [12] Y. Wei, G. Xing, K. Liu, G. Li, P. Dang, S. Liang, M. Liu, Z. Cheng, D. Jin, and J. Lin, "New strategy for designing orangish-red-emitting phosphor via oxygen-vacancy-induced electronic localization,"

- Light Sci. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1038/s41377-019-0126-1.
- [13] A. Kaur, A. Khanna, M. González-Barriuso, and F. González, “Thermal and light emission properties of rare earth (Eu^{3+} , Dy^{3+} and Er^{3+}), alkali (Li^+ , Na^+ and K^+) and Al^{3+} -doped barium tellurite and borotellurite glasses,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 32, no. 13, pp. 17266–17281, 2021, doi: 10.1007/s10854-021-06228-3.
- [14] S. J. Mofokeng, L. L. Noto, and M. S. Dhlamini, “Photoluminescence properties of $\text{ZnTiO}_3\text{:Eu}^{3+}$ phosphor with enhanced red emission by Al^{3+} charge compensation,” *J. Lumin.*, vol. 228, July 2020, Art. no. 117569, doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117569.
- [15] V. H. Pham, T. H. Bui, T. H. Bui, T. H. H. Nguyen, N. V. Hoang, X. T. Cao, H. A. Ho, D. T. Phuong, and H. V. Pham, “Correlation of luminescence and Judd-Ofelt intensity parameters in red $\text{ZrO}_2\text{:Eu}^{3+}, \text{Al}^{3+}$ phosphor: The influences of Al^{3+} ions,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 262, 2020, doi: 10.1016/j.mseb.2020.114794.
- [16] L. Sun, Y. Tan, D. Li, H. Du, and D. Guo, “Defects and symmetry influence on visible emission of Bi^{3+} Co-doped $\text{CeO}_2\text{:Eu}^{3+}$ phosphor,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 100, 2020, Art. no. 109654, doi: 10.1016/j.optmat.2020.109654.
- [17] W. Huang, Y. J. Tan, D. Li, H. Du, X. Hu, G. Li, Y. Kuang, M. Li, and D. Guo, “Improved photoluminescence by co-doped lithium in the phosphor system $\text{CeO}_2\text{:Eu}^{3+}$,” *J. Lumin.*, vol. 206, pp. 432–439, 2019, doi: 10.1016/j.jlumin.2018.10.072.
- [18] Q. Chen, B. Miao, P. S. Kumar, and S. Xu, “Enhanced luminescence properties and Judd-Ofelt analysis of novel red emitting $\text{Sr}_2\text{LiScB}_4\text{O}_{10}\text{:Eu}^{3+}$ phosphors for WLED applications,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 116, April 2021, Art. no. 111093, doi: 10.1016/j.optmat.2021.111093.
- [19] S. Bai, Y. Liu, G. Tan, W. Liu, D. Liu, R. Wang, Y. Zhu, S. Ye, and H. Ren, “Enhanced quantum efficiency and thermal stability in $\text{CaWO}_4\text{:Eu}^{3+}$ phosphor based on structural modification induced by co-doping Al^{3+} ,” *J. Lumin.*, vol. 225, 2020, Art. no. 117351, doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117351.
- [20] Y. Yang, Y. Shi, J. Duan, K. Lu, G. Gheng, Y. Zhao, Z. Huang, P. Li, N. Wei, X. Zhu, J. Qi, and T. Lu, “Photoluminescence enhancement of $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7\text{:Eu}^{3+}$ red phosphor sensitized by co-doped Al^{3+} ions,” *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 9, pp. 13071–13077, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.01.171.
- [21] V. T. Cu, T. D. Nguyen, V. H. Nguyen, T. N. M. Vu, X. T. Nguyen, A. T. Pham, V. H. Pham, and N. V. Hoang, “Intense green upconversion emission of rare-earth-doped $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2/\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$ powder: Effect of annealing temperature and temperature-sensor properties,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 264, March 2022, Art. no. 169446, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169446.
- [22] H. Jin, H. Wu, and L. Tian, “Improved luminescence of $\text{Y}_2\text{MoO}_6\text{:Eu}^{3+}$ by doping Li^+ ions for light-emitting diode applications,” *J. Lumin.*, vol. 132, no. 5, pp. 1188–1191, 2012, doi: 10.1016/j.jlumin.2011.12.066.
- [23] N. V. Hoang, V. H. Pham, D. H. Nguyen, N. H. Vu, and V. H. Pham, “Up/Down-Conversion Luminescence of Er^{3+} Doped $\text{ZrO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ Powder,” *J. Electron. Mater.*, vol. 48, no. 12, pp. 8054–8060, 2019, doi: 10.1007/s11664-019-07644-2.
- [24] T. N. Hoang, D. T. Phuong, V. H. Nguyen, and N. V. Hoang, “Multifunctional optical thermometry using dual-mode green emission of $\text{CaZrO}_3\text{:Er/Yb/Mo}$ perovskite phosphors,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 21, pp. 14660–14674, 2023, doi: 10.1039/d3ra02759g.