

FABRICATION AND STUDY OF STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF Eu^{3+} -DOPED MgF_2 CERAMICS SYNTHESIZED BY PLASMA SINTERING METHOD

Nguyen Thi Minh Thuy

TNU - University of Education

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	26/3/2025	In this study, $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ ceramic samples with different Eu^{3+} concentrations (0, 0.2, 0.5, 1, 3 and 5%) were fabricated by plasma sintering method. The structure and optical properties were studied through X-ray diffraction, photoluminescence excitation, photoluminescence emission and fluorescence lifetime measurements. The results showed that Eu^{3+} can enter the MgF_2 crystal lattice without changing the structural phase but causing a slight shift in the X-ray diffraction pattern due to the substitution of Mg^{2+} ions. The fluorescence excitation spectrum recorded the characteristic absorption lines of Eu^{3+} , with the strongest peak at 392 nm, suitable for excitation in red LED applications. The luminescence intensity reached the maximum at an Eu^{3+} concentration of 3%. The fluorescence lifetime decreases with increasing Eu^{3+} concentration. Eu^{3+} doping helps to create luminescent centers, enhance the luminescence ability and expand the application of the material in the fields of lighting, lasers and sensors.
Revised:	14/6/2025	
Published:	15/6/2025	
KEYWORDS		
Ceramic		
Rare earth		
Optical properties		
Structure		
Eu^{3+}		

CHẾ TẠO VÀ NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC, TÍNH CHẤT QUANG CỦA GỐM MgF_2 PHA TẠP Eu^{3+} TỔNG HỢP BẰNG PHƯƠNG PHÁP THIÊU KẾT PLASMA

Nguyễn Thị Minh Thủy

Trường Đại học Sư phạm - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	26/3/2025	Trong nghiên cứu này, các mẫu gốm $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ với nồng độ Eu^{3+} khác nhau (0, 0.2, 0.5, 1, 3 và 5%) được chế tạo bằng phương pháp thiêu kết plasma. Cấu trúc và các tính chất quang được nghiên cứu thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X, phổ kích thích huỳnh quang, phổ phát xạ huỳnh quang và đo thời gian sống huỳnh quang. Kết quả cho thấy, Eu^{3+} có thể đi vào mạng tinh thể MgF_2 mà không làm thay đổi pha cấu trúc, nhưng gây dịch chuyển nhẹ trong giản đồ XRD do sự thay thế ion Mg^{2+} . Phổ kích thích huỳnh quang ghi nhận các vạch hấp thụ đặc trưng của Eu^{3+} , với đỉnh mạnh nhất ở 392 nm, phù hợp để kích thích trong ứng dụng LED đỏ. Cường độ phát quang cao nhất được ghi nhận tại nồng độ Eu^{3+} là 3%. Thời gian sống huỳnh quang giảm dần khi nồng độ Eu^{3+} tăng. Việc pha tạp Eu^{3+} giúp tạo ra các tâm phát quang, tăng cường khả năng phát quang và mở rộng ứng dụng của vật liệu trong lĩnh vực chiếu sáng, laser và cảm biến.
Ngày hoàn thiện:	14/6/2025	
Ngày đăng:	15/6/2025	
TỪ KHÓA		
Gốm		
Đất hiếm		
Tính chất quang		
Cấu trúc		
Eu^{3+}		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12396>

Email: thuyntm@tnue.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

192

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Vật liệu nano MgF_2 là một trong những vật liệu quang học quan trọng nhờ vào tính ổn định hóa học cao, độ bền cơ học tốt và khả năng truyền quang rộng từ vùng tử ngoại (~ 120 nm) đến vùng hồng ngoại trung (~ 10 μm) [1] – [3]. Nhờ những đặc tính này, MgF_2 đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như quang học, laser, viễn thông, y sinh, và công nghệ cảm biến hồng ngoại [4] – [6]. Tuy nhiên, MgF_2 tinh khiết không có khả năng phát quang, do đó việc pha tạp các ion đất hiếm vào mạng tinh thể MgF_2 đã được nghiên cứu nhằm tạo ra các tâm phát quang mới, mở rộng ứng dụng của vật liệu này. Trong số các ion đất hiếm, Eu^{3+} là một chất kích hoạt quang học quan trọng, có khả năng phát quang mạnh trong vùng ánh sáng đỏ nhờ chuyển dời nội vùng f-f từ mức kích thích 3D_0 đến các mức 7F_j [7], [8]. Khi pha tạp Eu^{3+} vào MgF_2 , có thể xảy ra quá trình truyền năng lượng từ khuyết tật mạng đến ion Eu^{3+} , giúp tối ưu hóa hiệu suất phát quang. Ngoài ra, sự thay đổi cấu trúc tinh thể khi pha tạp Eu^{3+} cũng có thể tạo ra các mức năng lượng bẫy, ảnh hưởng đến tính chất nhiệt phát quang của vật liệu, mở ra hướng nghiên cứu mới trong đo liều bức xạ và cảm biến nhiệt.

Gốm MgF_2 pha tạp Eu^{3+} ($\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$) là một vật liệu tiên tiến với nhiều ưu điểm nổi bật, đặc biệt trong lĩnh vực quang học và phát quang. Nhờ có độ trong suốt cao trong vùng tử ngoại (UV), MgF_2 là nền vật liệu lý tưởng để pha tạp các ion hiếm như Eu^{3+} [9], [10]. Khi được pha tạp, Eu^{3+} tạo ra khả năng phát quang mạnh trong vùng ánh sáng đỏ, mang lại hiệu suất huỳnh quang vượt trội, rất hữu ích trong các ứng dụng như cảm biến, laser rắn và thiết bị chiếu sáng [10], [11]. Vật liệu này còn có độ ổn định nhiệt và hóa học cao, giúp duy trì tính chất phát quang ổn định trong điều kiện khắc nghiệt. Bên cạnh đó, cấu trúc tinh thể của MgF_2 hỗ trợ tối ưu cho sự kích thích và phát xạ của ion Eu^{3+} [12]. Đặc biệt, mức độ pha tạp có thể được điều chỉnh linh hoạt để đạt hiệu suất tối đa theo từng mục đích sử dụng. Với độ bền cơ học tốt, không độc hại và thân thiện môi trường, gốm $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ được đánh giá là vật liệu tiềm năng cho các ứng dụng công nghệ cao hiện nay và trong tương lai.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về vật liệu MgF_2 pha tạp Eu^{3+} , phần lớn các nghiên cứu tập trung vào vật liệu dạng bột khối, trong khi các nghiên cứu về vật liệu gốm $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ vẫn còn hạn chế. Vì vậy, nghiên cứu này hướng đến mục tiêu tổng hợp và đặc trưng tính chất quang của gốm MgF_2 pha tạp Eu^{3+} , từ đó đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu này trong lĩnh vực chiếu sáng. Các kết quả thu được sẽ giúp làm sáng tỏ ảnh hưởng của nồng độ Eu^{3+} đến cấu trúc và khả năng phát quang của vật liệu.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng hợp các mẫu gốm $\text{MgF}_2:\text{Eu}$

Các mẫu gốm $\text{MgF}_2:\text{Eu}$ với nồng độ Eu khác nhau (0,2, 0,5, 1, 3 và 5 %) đã được tổng hợp bằng phương pháp thiêu kết plasma. Hỗn hợp bột trộn MgF_2 và EuF_3 được cho vào khuôn graphite hình trụ có lỗ có đường kính 10,4 mm. Hỗn hợp được nung thiêu kết bằng cách cung cấp dòng xung điện qua cụm graphite trong lò SPS. Nhiệt độ được nâng từ nhiệt độ phòng lên 600 °C với tốc độ gia nhiệt 50 °C/phút dưới áp suất 5 MPa và sau đó giữ trong 15 phút. Tiếp theo, nhiệt độ được nâng lên 700 °C với tốc độ gia nhiệt 20 °C/phút dưới áp suất 50 MPa và sau đó giữ trong 10 phút, thu được mẫu gốm trong suốt $\text{MgF}_2:\text{Eu}$.

2.2. Các phương pháp đặc trưng tính chất

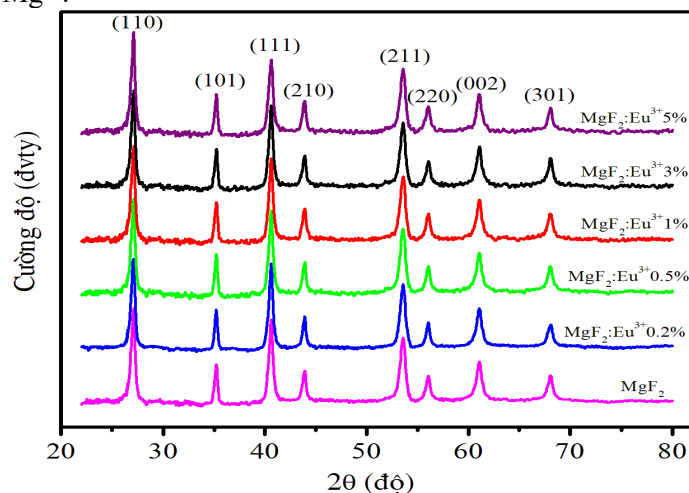
Cấu trúc tinh thể của mẫu được khảo sát bằng máy nhiễu xạ tia X (SIEMENS D-5005). Phổ kích thích huỳnh quang, quang huỳnh quang và thời gian sống huỳnh quang được đo bằng máy FLS1000, Edinburgh.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Giảm độ nhiễu xạ tia X của vật liệu MgF_2 và MgF_2 pha tạp ion Eu^{3+}

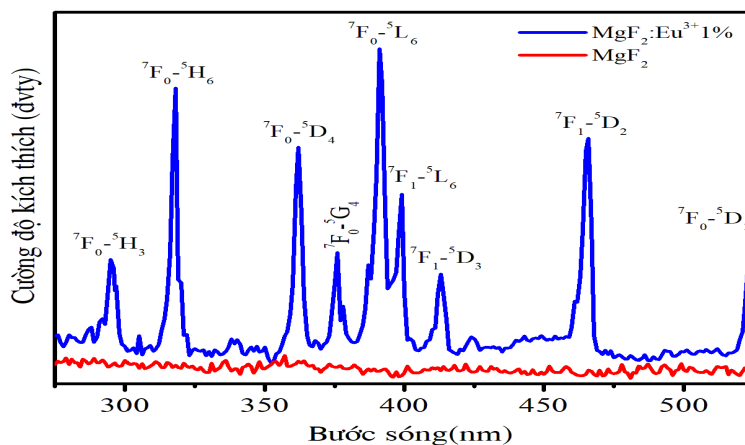
Kết quả đo giảm độ nhiễu xạ tia X (XRD) của mẫu gốm MgF_2 không pha tạp và pha tạp ion Eu^{3+} được trình bày trong Hình 1. Kết quả quan sát từ giản đồ XRD cho thấy các mẫu MgF_2 không pha

tạp và pha tạp ion Eu^{3+} đều xuất hiện các vạch nhiễu xạ đặc trưng của cấu trúc Tetragonal của vật liệu MgF_2 [13]. Tất cả các mẫu pha tạp Eu^{3+} vẫn giữ được cấu trúc tinh thể của MgF_2 , chứng tỏ rằng Eu^{3+} có thể đi vào mạng tinh thể mà không làm thay đổi pha cấu trúc của vật liệu nền. Không xuất hiện các pha của tạp Eu_2O_3 hoặc EuF_3 , chứng tỏ Eu^{3+} phân bố đều trong mạng tinh thể MgF_2 . Có thể nhận thấy các đỉnh nhiễu xạ của MgF_2 pha tạp Eu^{3+} có sự dịch chuyển nhẹ về góc 2θ nhỏ hơn khi tăng nồng độ Eu^{3+} . Hiện tượng này là do sự thay thế nhiều hơn ion Mg^{2+} (bán kính $\sim 0,72 \text{ \AA}$) bằng ion Eu^{3+} (bán kính $\sim 0,95 \text{ \AA}$), làm thay đổi hằng số mạng tinh thể [13], [14]. Các đỉnh nhiễu xạ dịch về phía góc 2θ nhỏ hơn, điều này cho thấy mạng tinh thể bị giãn ra do ion Eu^{3+} có kích thước lớn hơn ion Mg^{2+} .



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu MgF_2 và $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ với nồng độ Eu khác nhau

3.2. Phổ kích thích huỳnh quang



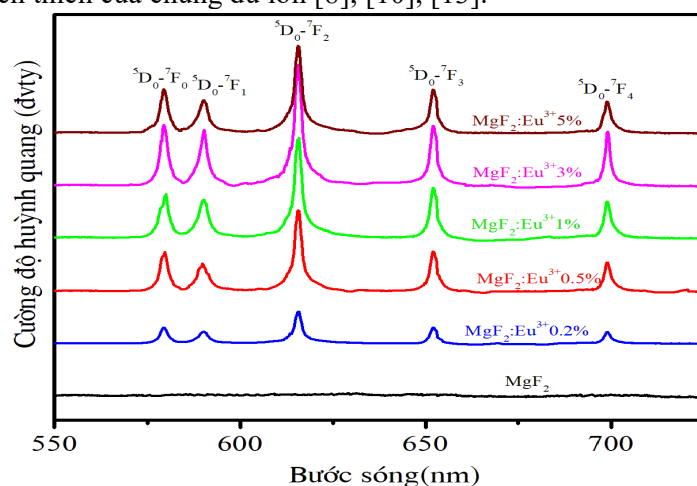
Hình 2. Phổ kích thích huỳnh quang của MgF_2 và $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ đo tại bước sóng 616 nm ($^5D_0 \rightarrow ^7F_2$) với nồng độ 1%

Phổ kích thích huỳnh quang (PLE) của MgF_2 pha tạp Eu^{3+} cung cấp thông tin quan trọng về các mức năng lượng mà ion Eu^{3+} hấp thụ năng lượng và chuyển lên trạng thái kích thích. Điều này giúp xác định các bước sóng kích thích hiệu quả nhất để tối ưu hóa cường độ phát quang. Phổ kích thích trong Hình 2 được đo bằng cách thu tại bước sóng 616 nm ($^5D_0 \rightarrow ^7F_2$) khi thay đổi bước sóng kích thích từ 250-550 nm. Phổ kích thích thu được các vạch kích thích đặc trưng của các chuyển dời $f-f$ của ion Eu^{3+} . Các đỉnh kích thích quan sát được chủ yếu do sự đóng góp bởi các chuyển dời điện tử từ mức 7F_0 và 7F_1 lên các mức năng lượng cao hơn của ion Eu^{3+} [7], [9], tương ứng là $^7F_0 \rightarrow ^5H_3$ (295 nm), $^7F_0 \rightarrow ^5H_6$ (318 nm), $^7F_0 \rightarrow ^5D_4$ (362 nm), $^7F_0 \rightarrow ^5G_4$ (376 nm), $^7F_0 \rightarrow ^5L_6$ (392 nm), 7F_1

$\rightarrow {}^5L_6$ (398 nm), ${}^7F_1 \rightarrow {}^5D_3$ (413 nm), ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$ (465 nm), ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ (524 nm) [10], [11]. Có thể thấy cường độ các vạch kích thích tương ứng với các chuyển dời ${}^7F_0 \rightarrow {}^5H_6$, ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_4$, ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ và ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$ khá mạnh, trong khi các chuyển dời còn lại có cường độ yếu hơn. Trong các ứng dụng chiếu sáng LED UV, dải ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ (~392 nm) rất quan trọng vì có cường độ hấp thụ mạnh. Phổ kích thích mạnh trong vùng UV (~392 nm) phù hợp để chế tạo LED đỏ phát quang từ Eu^{3+} .

3.3. Nghiên cứu tính chất phát quang của MgF_2 pha tạp ion Eu^{3+}

Phổ phát quang của các mẫu $\text{MgF}_2:\text{xEu}^{3+}$ với nồng độ Eu (x) khác nhau, kích thích bởi bước sóng 392 nm (${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$) được trình bày trong Hình 3. Ở nồng độ $\text{Eu}^{3+} = 0\%$ (mẫu MgF_2 tinh khiết) không có đỉnh phát quang trong vùng nhìn thấy, do MgF_2 không chứa tâm phát quang. Phổ phát xạ của các mẫu MgF_2 pha tạp Eu^{3+} xuất hiện 5 đỉnh phát xạ ở các bước sóng 579 nm (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$), 590 nm (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$), 616 nm (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$), 652 nm (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$) và 698 nm (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$) [8], [12], [14]. Các đỉnh này bắt nguồn từ các chuyển đổi điện từ trong cấu hình $4f^6$ của các ion Eu^{3+} . Trong vật liệu MgF_2 , các mức năng lượng của Eu^{3+} bị ảnh hưởng bởi trường tinh thể, dẫn đến sự tách mức năng lượng. Điều đáng chú ý là các electron $4f^n$ trong các ion Eu^{3+} được che chắn hiệu quả bởi các orbital $5s^2$ và $5p^6$ đã lấp đầy, nên giảm thiểu ảnh hưởng của trường tinh thể lên các chuyển đổi $f-f$. Do đó, các chuyển đổi trong cấu hình $4f^n$ thường tạo ra các đỉnh sắc nét trong quang phổ phát xạ [9], [11]. Như thể hiện trong Hình 3, các dải phát xạ có nguồn gốc từ mức 5D_0 chiếm ưu thế trong quang phổ phát quang, trong đó các dải ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ thể hiện cường độ mạnh nhất. Do đó, dải phát xạ ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ có thể được sử dụng cho các nguồn phát laser nếu mặt cắt phát xạ kích thích của chúng đủ lớn [8], [10], [13].



Hình 3. Phổ quang phát quang của vật liệu $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ kích thích bởi bước sóng 392 nm (${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$) với nồng độ Eu khác nhau

Khi nồng độ Eu^{3+} tăng lên, cường độ phát xạ của các đỉnh tăng lên do tăng cường các tâm phát xạ. Ở nồng độ Eu^{3+} là 3% cường độ phát quang đạt cực đại. Ở nồng độ Eu^{3+} là 5%, cường độ huỳnh quang giảm xuống do sự tương tác giữa các ion Eu^{3+} ở khoảng cách gần, được gọi là hiện tượng dập tắt huỳnh quang do nồng độ (concentration quenching). Dập tắt huỳnh quang do nồng độ xảy ra khi nồng độ ion Eu^{3+} vượt quá mức tối ưu, khiến các ion ở gần nhau hơn và dễ xảy ra tương tác không bức xạ. Năng lượng kích thích truyền từ ion này sang ion khác mà không phát ra ánh sáng, dẫn đến suy giảm cường độ phát quang. Cơ chế truyền năng lượng không bức xạ gồm tương tác trao đổi và tương tác đa cực. Hiện tượng này thường làm giảm hiệu suất phát quang và gây mở rộng đỉnh phổ. Cường độ phát quang của mẫu pha tạp Eu^{3+} là 5% giảm so với mẫu 3% do sự truyền năng lượng không bức xạ (non-radiative) giữa các ion Eu^{3+} . Có thể quan sát thấy sự mở rộng đỉnh phổ do sự tương tác giữa các tâm phát quang.

3.4. Thời gian sống phát quang

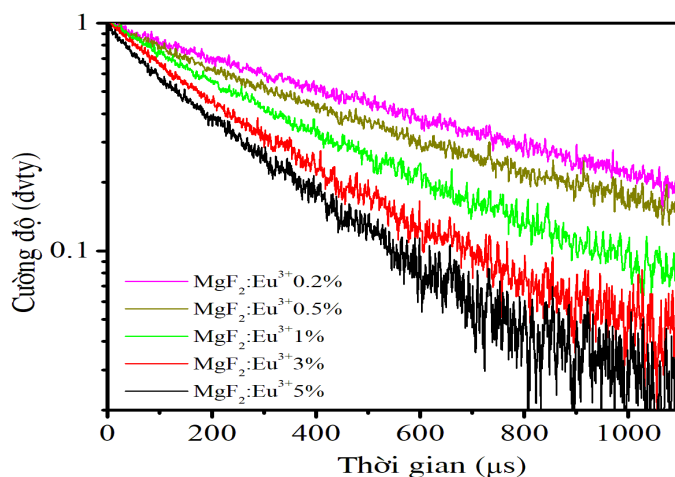
Thời gian sống phát xạ là một thông số quan trọng để hiểu về động học của quá trình phát quang trong vật liệu MgF_2 pha tạp Eu^{3+} . Nó giúp đánh giá cơ chế phát quang, hiệu suất lượng tử, và các hiệu ứng không bức xạ. Chúng tôi tiến hành thực nghiệm đo thời gian sống của dải phát xạ 616 nm ($^5D_0 \rightarrow ^7F_2$), kết quả được quan sát trên Hình 4. Thời gian sống của các mẫu được xác định từ đường cong phân rã huỳnh quang bằng cách làm khớp nó với hai hàm e mũ, được cho bởi phương trình [7], [9]:

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \exp(-t/\tau_i) \quad (1)$$

Trong đó, τ_i là thời gian sống của tâm phát xạ i và A_i là hệ số. Thời gian sống trung bình được tính bằng phương trình sau [7], [9]:

$$\langle \tau \rangle = \sum_{i=1}^2 A_i \tau_i^2 / \sum_{i=1}^2 A_i \tau_i \quad (2)$$

Thời gian sống trung bình phụ thuộc vào hệ số mũ và thời gian sống của từng thành phần i . Các tham số A_i , τ_i và $\langle \tau \rangle$ của đỉnh phát xạ 616 nm được tính toán cho tất cả các nồng độ và được liệt kê trong Bảng 1. Kết quả quan sát được trong Bảng 1 cho thấy khi nồng độ Eu tăng lên thì thời gian sống giảm rõ rệt. Hiện tượng này phản ánh một cơ chế vật lý quen thuộc trong các hệ vật liệu phát quang, được gọi là “dập tắt do nồng độ” [7], [8], [12]. Ban đầu, khi nồng độ Eu^{3+} còn thấp, các ion phát quang phân bố rời rạc trong mạng tinh thể MgF_2 . Mỗi ion Eu^{3+} có thể hấp thụ năng lượng (từ nguồn kích thích) và sau đó phát xạ photon với thời gian sống khá dài, do ít bị ảnh hưởng bởi các tâm khác xung quanh. Khi tăng dần nồng độ Eu^{3+} , các ion này bắt đầu tiến gần nhau hơn trong cấu trúc tinh thể dẫn đến tăng xác suất tương tác lẫn nhau do các hiệu ứng: (i) trao đổi năng lượng không bức xạ giữa các ion Eu^{3+} , (ii) hình thành các cặp hoặc cụm ion, nơi năng lượng bị mất qua quá trình không bức xạ, (iii) tăng khả năng truyền năng lượng đến các tâm bẫy hoặc khuyết tật cấu trúc – nơi năng lượng bị mất đi mà không phát ra ánh sáng. Kết quả là nhiều trạng thái kích thích bị “dập tắt” trước khi kịp phát ra photon dẫn đến thời gian sống huỳnh quang giảm dần theo nồng độ.



Hình 4. Đường cong suy giảm huỳnh quang của vật liệu $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ đo tại đỉnh phát xạ 616 nm ($^5D_0 \rightarrow ^7F_2$) với nồng độ Eu khác nhau

Bảng 1. Các tham số làm khớp từ đường cong suy giảm huỳnh quang của vật liệu $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ với nồng độ Eu khác nhau

Mẫu	$A_1(\%)$	$\tau_1(\mu\text{s})$	$A_2(\%)$	$\tau_2(\mu\text{s})$	$\langle \tau \rangle (\mu\text{s})$
$\text{MgF}_2:\text{Eu} 0.2\%$	34,5	123,5	65,5	668,5	620,2
$\text{MgF}_2:\text{Eu} 0.5\%$	31,3	115,8	68,7	538,8	501,1
$\text{MgF}_2:\text{Eu} 1\%$	32,8	132,4	67,2	385,8	349,4
$\text{MgF}_2:\text{Eu} 3\%$	29,6	119,6	70,4	279,9	255,5
$\text{MgF}_2:\text{Eu} 5\%$	32,1	128,7	67,9	229,8	208,6

4. Kết luận

Vật liệu gồm MgF_2 pha tạp Eu^{3+} được chế tạo thành công bằng phương pháp thiêu kết plasma. Kết quả cho thấy Eu^{3+} có thể đi vào mạng tinh thể MgF_2 mà không làm thay đổi pha cấu trúc, nhưng gây ra sự dịch chuyển nhẹ trong giản đồ XRD do thay thế ion Mg^{2+} . Phổ huỳnh quang của vật liệu cho thấy các vạch phát xạ sắc nét đặc trưng của ion Eu^{3+} , với cường độ phát quang mạnh nhất tại 616 nm ($^3D_0 \rightarrow ^7F_2$). Khi nồng độ Eu^{3+} tăng, cường độ phát quang cũng tăng và đạt cực đại ở nồng độ 3%. Tuy nhiên, ở nồng độ 5%, cường độ phát quang giảm do hiệu ứng dập tắt huỳnh quang do nồng độ. Thời gian sống huỳnh quang giảm dần theo sự gia tăng nồng độ Eu^{3+} , phản ánh sự tăng cường của các quá trình truyền năng lượng không bức xạ giữa các ion Eu^{3+} . Những kết quả này giúp hiểu rõ hơn về động học phát quang của vật liệu $\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ và khẳng định tiềm năng ứng dụng của vật liệu này trong công nghệ chiếu sáng, cảm biến quang học và laser.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2025-TNA-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Lou, Y. Sun, Y. Chen, R. Zan, H. Peng, S. Yang, X. Kang, Z. Peng, W. Wang, and X. Zhang, "Effects of MgF_2 coating on the biodegradation and biological properties of magnesium," *Surf Coat Technol*, vol. 422, 2021, Art. no. 127552.
- [2] M. Wojciechowska, M. Zieliński, and M. Pietrowski, " MgF_2 as a non-conventional catalyst support," *J. Fluor Chem.*, vol. 120, pp. 1–11, 2003.
- [3] V. Nečina, J. Hostaša, W. Pabst, and M. Veselý, "Magnesium fluoride (MgF_2) – A novel sintering additive for the preparation of transparent YAG ceramics via SPS," *J. Eur. Ceram Soc.*, vol. 42, pp. 3290–3296, 2022.
- [4] Y. Sugai, H. Sugata, and T. Sugawara, "Optical chemical and coverage properties of magnesium fluoride formed by atomic layer deposition," *Opt Rev.*, vol. 31, pp. 242–246, 2024.
- [5] M. S. Hagag, "Outpacing sol-gel-prepared magnesium fluoride for rare earth element separation by mixed mechanisms over many second-group fluorides," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 113, pp. 819–836, 2025.
- [6] S. Gambaro, M. L. Nascimento, M. Shekargoftar, S. Ravanbakhsh, V. Sales, C. Paternoster, M. Bartosch, F. Witte, and D. Mantovani, "Characterization of a Magnesium Fluoride Conversion Coating on Mg-2Y-1Mn-1Zn Screws for Biomedical Applications," *Materials*, vol. 15, 2022, Art. no. 8245.
- [7] T. H. Nguyen, Y. Y. Yu, K. C. Park, X. C. Nguyen, T. K. C. Tran, T. T. H. Bui, D. T. Luong, V. D. Phan, M. T. Pham, and T. T. H. Pham, "Influence of Eu doping on the structural and optical properties of $\text{Zn}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$ quantum dots," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 148, 2021, Art. no. 109729.
- [8] C. C. Khong, T. M. T. Nguyen, X. Fan, V. H. Pham, K. Q. Le, T. T. H. Trinh, T. K. Nguyen, T. K. V. Nguyen, T. H. Nguyen, N. D. Lo, and X. C. Nguyen, "Optical properties, Judd-Ofelt analysis and energy transfer processes of Eu^{3+} doped ZnS quantum dots," *Chemical Physics Letters*, vol. 832, 2023, Art. no. 140896.
- [9] T. T. H. Tran, T. S. Nguyen, T. M. T. Nguyen, V. H. Pham, H. T. Nguyen, T. H. Nguyen, and X. C. Nguyen, " Eu^{3+} -doped ZnO quantum dots: structure, vibration characteristics, optical properties, and energy transfer process," *Nanoscale Adv.*, vol. 7, pp. 909–921, 2025.
- [10] L. Zhang, X. Zhang, C. Zhao, and X. Xiao, "Effects of Eu^{3+} doping on the luminescence properties of novel $\text{Sr}_2\text{CaLa}(\text{VO}_4)_3$ from partial substitution of Sr^{2+} by Ca^{2+} in $\text{Sr}_3\text{La}(\text{VO}_4)_3$," *Ceram. Int.*, vol. 47, pp. 34323–34332, 2021.
- [11] M. Zagrai, R. C. Suciu, S. Rada, M. E. Pica, and S. Pruneanu, "Structural and optical properties of Eu^{3+} ions in lead glass for photonic applications," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 569, 2021, Art. no. 120988.
- [12] X. Hu, A. Zhang, H. Sun, F. Zeng, Y. Lei, L. Xie, R. Yu, B. Deng, and H. Lin, "Novel red-emitting $\text{Sr}_3\text{LaTa}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ phosphor with high color purity and stability for w-LEDs and visualization of latent fingerprint," *J. Lumin.*, vol. 258, 2023, Art. no. 119806.
- [13] L. G. Jacobsohn, A. L. Roy, C. L. McPherson, C. J. Kucera, L. C. Oliveira, E. G. Yukihiro, and J. Ballato, "Rare earth-doped nanocrystalline MgF_2 : Synthesis, luminescence and thermoluminescence," *Optical Materials*, vol. 35, pp. 2461–2464, 2013.
- [14] J. Lin, S. Pang, and Q. Wang, "Ultrasonic-assisted microwave synthesis of luminescent $\text{V}_2\text{O}_5/\text{MgF}_2:\text{Eu}^{3+}$ and its catalytic properties," *Materials Letters*, vol. 98, pp. 12–14, 2013.