

Nghiên cứu tính chất quang của vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ tổng hợp bằng phản ứng pha rắn

Nguyễn Thị Thương, Nguyễn Văn Quang*

Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2, 32 Nguyễn Văn Linh, phường Xuân Hòa, tỉnh Phú Thọ, Việt Nam

Ngày nhận bài 31/3/2025; ngày chuyển phản biện 2/4/2025; ngày nhận phản biện 21/4/2025; ngày chấp nhận đăng 29/4/2025

Tóm tắt:

Các chất phát quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phát xạ màu đỏ đã được tổng hợp bằng phản ứng pha rắn cải tiến. Vật liệu được hình thành và đơn pha ở nhiệt độ nung trên 1200°C , có cấu trúc spinel dạng lập phương. Kết quả phân tích hình ảnh FESEM vật liệu cho kích thước hạt từ 500 nm đến 1 μm . Phổ kích thích huỳnh quang (PLE) cho thấy các mẫu thu được có dải hấp thụ rộng trong khoảng 270-500 nm, với đỉnh hấp thụ mạnh tại 272, 394 và 465 nm. Trong đó, đỉnh hấp thụ ở bước sóng ~ 394 nm có thể được gán cho sự chuyển mức năng lượng $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{L}_6$ của ion Eu^{3+} . Dưới sự kích thích ở bước sóng 394 nm, vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phát xạ mạnh vùng cam - đỏ (bước sóng từ 570 đến 700 nm) với các đỉnh phát xạ đỏ mạnh nhất ở 613 và 616 nm. Cường độ phát quang (PL) cao nhất được quan sát khi nhiệt độ nung mẫu ở 1300°C . Các kết quả này cho thấy tiềm năng lớn trong việc sử dụng bột huỳnh quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ phát quang màu đỏ cho các ứng dụng WLED.

Từ khóa: ánh sáng trắng, $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$, phản ứng pha rắn, phát xạ đỏ.

Chỉ số phân loại: 1.3, 1.4, 2.5

Investigation of the optical properties of $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphors synthesised by solid-state reaction method

Thi Thuong Nguyen, Van Quang Nguyen*

Hanoi Pedagogical University 2, 32 Nguyen Van Linh Street, Xuan Hoa Ward, Phu Tho Province, Vietnam

Received 31 March 2025; revised 21 April 2025; accepted 29 April 2025

Abstract:

Red-emitting $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphors were synthesised via an improved solid-state reaction method. The formation of a monophasic structure was confirmed at calcination temperatures exceeding 1200°C , exhibiting a cubic spinel crystal structure. FESEM analysis revealed that the synthesised particles possessed sizes ranging from 500 nm to 1 μm . Photoluminescence excitation (PLE) spectra showed a broad excitation band in the 270-500 nm region, with prominent excitation peaks at 272, 394, and 465 nm. In particular, the excitation peak located at approximately 394 nm can be attributed to the $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{L}_6$ electronic transition of Eu^{3+} ions. Upon excitation at 394 nm, the $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphors exhibited intense orange-red emission in the 570-700 nm region, with the strongest red emission peaks at 613 and 616 nm. The highest photoluminescence (PL) intensity was observed for the sample calcined at 1300°C . These results demonstrate the considerable potential of $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ red-emitting phosphors for applications in white light-emitting diodes (WLEDs).

Keywords: $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$, red emission, solid-state reaction, white light.

Classification numbers: 1.3, 1.4, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: nguyenvanquang83@hpu2.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Cùng với sự phát triển của công nghệ nói chung, công nghệ chiếu sáng cũng có những cải tiến rõ rệt. Trước đây, người ta sử dụng các nguồn chiếu sáng dân dụng là đèn dầu hoặc nến; sau đó dùng ánh sáng bằng đèn sợi đốt, tuy nhiên, đèn sợi đốt có hiệu suất phát quang thấp, tiêu tốn điện năng và tỏa nhiệt lớn. Tiếp theo, việc sử dụng đèn huỳnh quang tuy đã tiết kiệm hơn so với đèn sợi đốt nhưng cũng có nhược điểm sử dụng hơi thủy ngân ảnh hưởng đến sức khỏe con người và chỉ số hoàn màu (CRI) thấp, nhiệt độ màu cao dẫn đến chất lượng ánh sáng không tốt. Hiện nay, người ta sử dụng các đèn LED thân thiện môi trường, tiết kiệm điện năng. Để chế tạo WLED thương mại hiện nay, người ta thường sử dụng bột YAG: Ce^{3+} phủ lên chip Blue LED [1-9]. Tuy nhiên, WLED này có nhược điểm là thiếu vùng ánh sáng đỏ nên chỉ số hoàn màu không cao [2]. Để khắc phục nhược điểm này, các nhà nghiên cứu đã chế tạo các bột huỳnh quang phát xạ đỏ dựa vào sự phát xạ của ion Eu^{3+} trong các mạng nền khác nhau [1, 2, 10]. Theo tìm hiểu của chúng tôi, tuy đã có nghiên cứu về $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$, việc khảo sát hệ vật liệu tổng hợp bằng phản ứng pha rắn cải tiến trong dải nhiệt độ nung cao 1000-1300°C, gần với thử nghiệm chế tạo LED trên chip 395 nm, vẫn cần được làm rõ [11].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ bằng phương pháp phản ứng pha rắn có cải tiến kết hợp với thiêu kết ở nhiệt độ cao để nâng cao cường độ phát xạ của bột huỳnh quang. Chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến cấu trúc tinh thể và tính chất quang của vật liệu. Đặc biệt, chúng tôi thử nghiệm chế tạo LED ánh sáng đỏ từ vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ và chip 395 nm. Các kết quả được trình bày chi tiết trong phần kết quả và bàn luận.

2. Thử nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Thử nghiệm

Vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp Eu^{3+} 3% được tổng hợp bằng phương pháp phản ứng pha rắn cải tiến, các hóa chất ban đầu gồm MgO , Ga_2O_3 và EuCl_3 . Quy trình chế tạo vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ được tiến hành như sau: Cho vào cốc

thủy tinh dung tích 100 ml lượng hóa chất gồm 0,798 gam MgO ; 3,7489 gam Ga_2O_3 và 0,194 gam EuCl_3 sau đó thêm 50 ml nước cất hai lần, khuấy đều bằng máy khuấy từ, bật nhiệt độ khuấy từ ở 100°C, tiếp tục khuấy đến cạn. Mẫu được sấy trong tủ sấy thường ở 200°C trong 5 giờ, nghiền mịn mẫu bằng cối mã não. Cuối cùng, nung mẫu ở nhiệt độ 1000°C đến 1300°C, 5 giờ trong không khí để thu được các vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

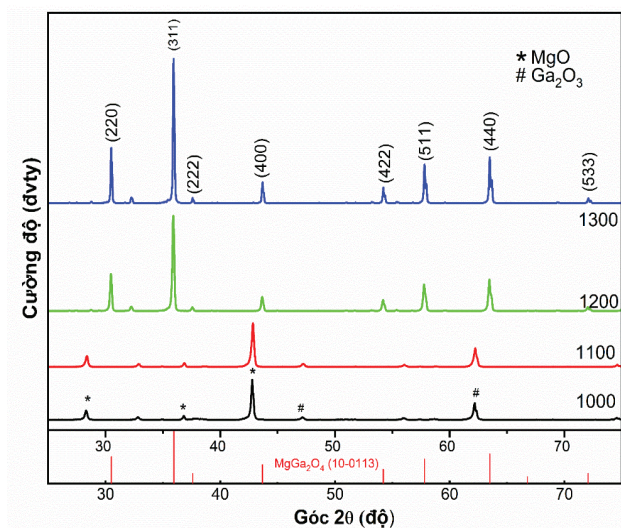
Vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ sau khi chế tạo được nghiên cứu cấu trúc tinh thể, hình thái bề mặt, thành phần hoá học, tính chất quang của vật liệu và thử nghiệm chế tạo LED. Phân tích cấu trúc tinh thể bằng phép đo nhiễu xạ tia X, phân tích hình ảnh bề mặt vật liệu bằng phép đo hiển vi điện tử phát xạ trường (FESEM), nghiên cứu tính chất quang bằng phép đo phổ huỳnh quang (PL) và phổ kích thích huỳnh quang (PLE).

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả phân tích cấu trúc tinh thể của vật liệu

Đặc tính cấu trúc các mẫu XRD của các bột huỳnh quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ được xử lý trong không khí, 5 giờ ở các nhiệt độ khác nhau từ 1000 đến 1300°C, được minh họa trong hình 1. Nung ở 1000 và 1100°C chỉ quan sát thấy các pha tinh thể của các tiền chất ban đầu gồm các tinh thể MgO và Ga_2O_3 [12, 13], cụ thể ở các đỉnh nhiễu xạ $2\theta=36,83^\circ$ và $42,8^\circ$ tương ứng với mặt phẳng (111) và (200) và đỉnh nhiễu xạ $28,24^\circ$ của tinh thể MgO ứng với thẻ chuẩn JCPDS-4-829 [13]; còn các đỉnh nhiễu xạ $2\theta=47,16^\circ$; $62,2^\circ$ tương ứng với mặt phẳng (-203) và (-711) của tinh thể Ga_2O_3 ứng với thẻ chuẩn 43-1012 [12]. Khi các mẫu được ủ ở nhiệt độ từ 1200 đến 1300°C, các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của cấu trúc tinh thể spinel MgGa_2O_4 tinh thể lập phương (thẻ chuẩn JCPDS 10-0113) ở $2\theta=30,44^\circ$; $35,88^\circ$; $37,6^\circ$; $43,71^\circ$; $54,22^\circ$; $57,8^\circ$; $63,46^\circ$ và $72,07^\circ$ tương ứng với các mặt phẳng (220), (311), (222), (400), (422), (511), (440) và (533) được quan sát thấy và không có pha tinh thể nào khác được nhận ra [11]. Ngoài ra, cần lưu ý rằng có sự tăng cường cường độ

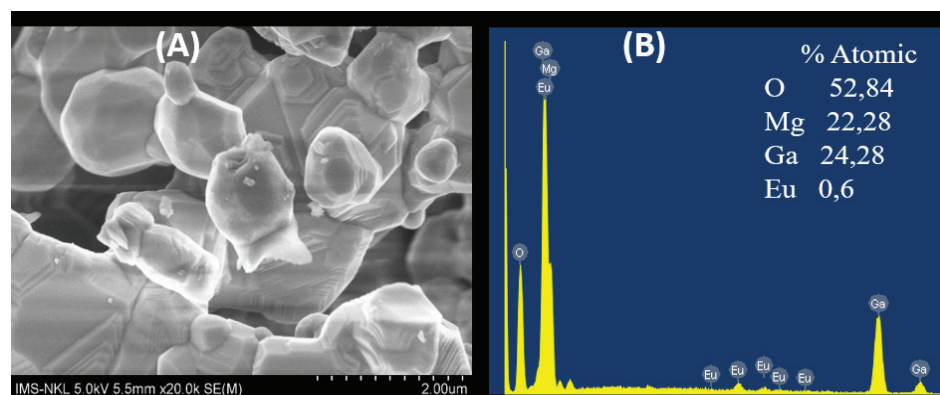
của đỉnh nhiễu xạ mạnh nhất ở vị trí $2\theta=35,9^\circ$ khi nhiệt độ tăng từ 1200 đến 1300°C; tuy nhiên, ở nhiệt độ nung mẫu trên 1300°C thì vật liệu bị chảy. Điều này có thể kết luận rằng, chất lượng tinh thể tốt nhất của pha MgGa_2O_4 thu được ở 1300°C trong điều kiện nghiên cứu này.



Hình 1. Giảm nhiễu xạ tia X của vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ nung ở nhiệt độ 1000-1300°C, 5 giờ trong không khí.

3.2. Kết quả phân tích hình thái và thành phần hoá học của vật liệu

Trên cơ sở vật liệu cho kết tinh tốt nhất khi nung thiêu kết ở 1300°C, chúng tôi đã tiến hành phân tích hình thái bề mặt và kích thước hạt của vật liệu bằng phép đo FESEM. Kết quả hình 2A cho thấy, vật liệu có dạng hạt kích thước từ 500 nm đến 1 μm . Phân tích thành phần hóa học ở hình 2B chỉ ra rằng, thành phần hóa học của vật liệu chỉ gồm các nguyên tố Mg, Ga, O và Eu. Điều này chứng tỏ vật liệu thu



Hình 2. Hình thái bề mặt (A) và thành phần hoá học (B) của vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ nung ở nhiệt độ 1300°C, 5 giờ trong không khí.

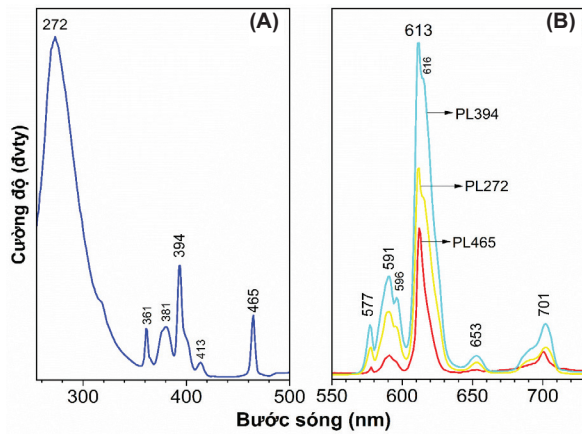
được không phát hiện tạp nguyên tố đáng kể trong giới hạn phép đo EDX và tính chất quang chỉ do nguyên tố Eu^{3+} trong mạng nền MgGa_2O_4 tạo ra.

3.3. Kết quả phân tích tính chất quang của vật liệu

Để khảo sát khả năng hấp thụ của vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$, chúng tôi đã tiến hành đo phổ kích thích huỳnh quang của mẫu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ ứng với đỉnh phát xạ 613 nm. Kết quả thu được cho thấy, chất phát quang thu được hấp thụ mạnh ở các bước sóng ~ 272 nm và ~ 394 nm [11, 14, 15]. Đỉnh hấp thụ ở bước sóng ~ 272 nm có thể được giải thích bởi sự chuyển electron từ orbital 2p hoàn toàn lấp đầy của ion O^{2-} sang orbital 4f một phần lấp đầy của ion Eu^{3+} hóa trị ba [14, 15]. Đỉnh hấp thụ ở bước sóng ~ 394 nm có thể được gán cho sự chuyển mức năng lượng ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$ của ion Eu^{3+} . Thêm vào đó, một đỉnh hấp thụ yếu hơn khác có thể quan sát thấy ở các bước sóng ~ 361 nm (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_4$), 381 nm (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{G}_2$), 413 nm (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_3$) và 465 nm (${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_2$), đặc trưng cho các chuyển dời electron f-f của ion Eu^{3+} [15, 16]. Phổ phát quang (PL) trong hình 3B cho thấy rằng, dưới bước sóng kích thích 272, 394 và 465 nm, chất phát quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ phát xạ trong vùng cam - đỏ, với phạm vi từ 570 đến 700 nm. Trong đó, các đỉnh phát xạ đỏ mạnh tại ~ 613 và ~ 616 nm liên quan đến sự chuyển dời lưỡng cực điện từ ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ của ion Eu^{3+} [11, 14, 15, 17]. Các đỉnh trong vùng cam, đặc biệt quanh 591 và 596 nm, gắn với chuyển dời lưỡng cực điện từ ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ [11, 14, 15, 17]. Ngoài ra, các đỉnh phát xạ tại ~ 653 nm và trong khoảng ~ 680 -710 nm có thể được quy cho các chuyển đổi

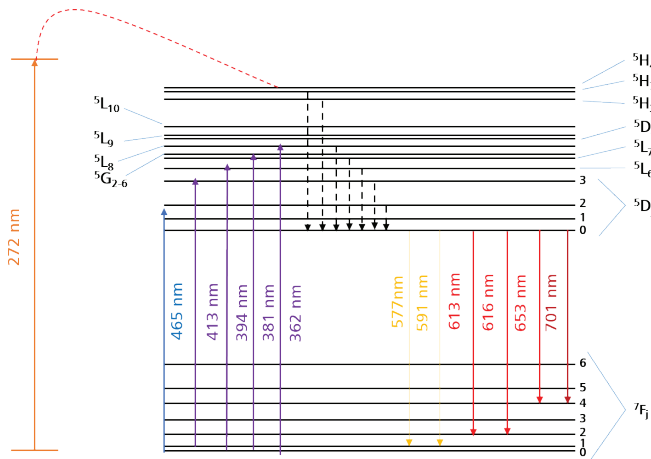
electron tương ứng ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$ và ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$ của ion Eu^{3+} [11, 14, 15, 17]. Kết quả thu được từ hình 3B cũng cho thấy khi kích bởi bước sóng 394 nm, cường độ phát quang mạnh hơn đáng kể so với khi kích thích ở 272 nm, 465 nm. Điều này được giải thích mặc dù phổ hấp thụ 272 nm mạnh hơn 394 nm, nhưng phát xạ mạnh ở bước sóng kích thích 394 nm là do xác suất chuyển dời của điện từ ở

trạng thái 5L_6 về các trạng thái 7F . Trong khi đó khi điện tử kích thích lên dải CTB có thể đã dẫn đến quá trình tái hợp không phát xạ khi điện tử dịch về trạng thái trung gian của tâm phát xạ, quá trình này làm cường độ huỳnh quang giảm. Các kết quả này chỉ ra rằng, bước sóng kích thích ~ 394 nm là phù hợp để nghiên cứu sâu hơn về tính chất quang học của vật liệu này.



Hình 3. Phổ kích thích huỳnh quang (A) và phổ phát quang (B) của vật liệu $MgGa_2O_4:3\%Eu^{3+}$ nung ở $1300^\circ C$ trong 5 giờ.

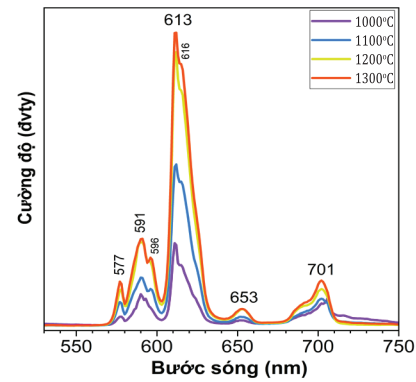
Hình 4 là sơ đồ mức năng lượng của vật liệu huỳnh quang $MgGa_2O_4$ pha tạp Eu^{3+} minh họa trạng thái năng lượng của các ion Eu^{3+} cùng với cơ chế có thể xảy ra của quá trình truyền điện tích, chuyển đổi bức xạ và không bức xạ giữa các trạng thái lượng tử khác nhau.



Hình 4. Sơ đồ minh họa các quá trình quang vật lý trong chất phát quang $MgGa_2O_4$ pha tạp Eu^{3+} .

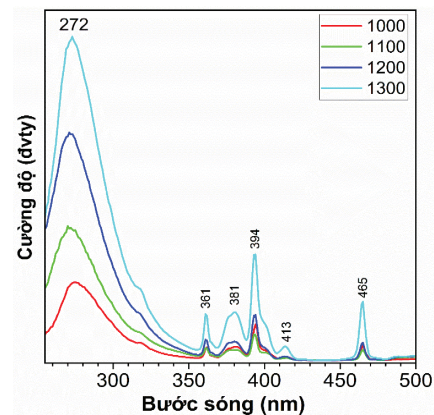
Phổ phát quang của vật liệu huỳnh quang $MgGa_2O_4:3\%Eu^{3+}$ được nung ở các nhiệt độ khác nhau, trong khoảng từ 1000 đến $1300^\circ C$ được nghiên cứu và trình bày trong hình 5. Kết quả hình 5 chỉ ra rằng, phổ phát quang có hình dạng tương tự nhau đều cho phát xạ vùng cam đến đỏ, phát xạ mạnh trong vùng ánh sáng đỏ

và cực đại ở đỉnh 613 và 616 nm. Tuy nhiên, cường độ có sự thay đổi rõ rệt, ở nhiệt độ 1000 và $1100^\circ C$ cường độ phát xạ khá yếu, điều này cũng phù hợp với cấu trúc tinh thể bởi ở nhiệt độ này cấu trúc tinh thể chưa hình thành, nguyên nhân phát xạ ở nhiệt độ nung mẫu này là $MgO:Eu^{3+}$ và $Ga_2O_3:Eu^{3+}$. Ở nhiệt độ nung mẫu 1200, $1300^\circ C$ cường độ huỳnh quang tăng mạnh và phát xạ mạnh nhất ở nhiệt độ nung $1300^\circ C$, điều này là do ở nhiệt độ nung cao hơn chất lượng tinh thể tốt hơn và sự tăng cường khuếch tán Eu^{3+} trong mạng nền [18].



Hình 5. Phổ phát quang của vật liệu $MgGa_2O_4:3\%Eu^{3+}$ nung ở nhiệt độ khác nhau với bước sóng kích thích 394 nm, đo ở nhiệt độ phòng.

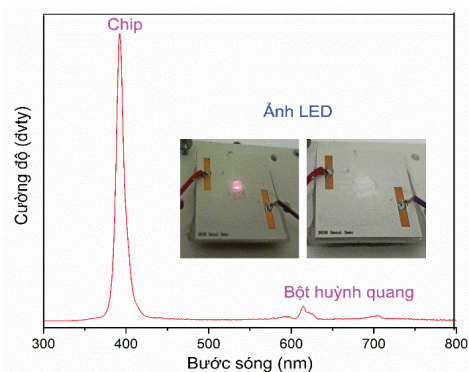
Để thêm khẳng định ảnh hưởng của nhiệt độ nung mẫu đến tính chất quang của vật liệu, chúng tôi tiến hành đo phổ kích thích huỳnh quang của vật liệu theo nhiệt độ nung mẫu. Kết quả hình 6 cho thấy, nhiệt độ nung mẫu thay đổi hình dạng phổ tương tự nhau, vật liệu hấp thụ mạnh ở bước sóng 272 và 394 nm, ngoài ra vật liệu hấp thụ đỉnh khác với cường độ yếu hơn. Điều này phù hợp hoàn toàn với phổ phát quang ở hình 5.



Hình 6. Phổ kích thích huỳnh quang của vật liệu $MgGa_2O_4:Eu^{3+}$ nung ở nhiệt độ từ 1000 đến $1300^\circ C$, 5 giờ trong không khí, đo ở nhiệt độ phòng ứng với đỉnh phát xạ 613 nm.

3.4. Thử nghiệm chế tạo LED

Thử nghiệm chế tạo LED được thực hiện bằng cách sử dụng bột huỳnh quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ kết hợp với chip 395 nm. Hình 7 thể hiện kết quả phổ điện quang của sự kết hợp giữa chip 395 nm và bột huỳnh quang, cùng với ảnh thực tế của LED. Kết quả từ hình 7 cho thấy, khi sử dụng chip 395 nm và phủ bề mặt bằng vật liệu huỳnh quang, một vùng phát xạ đỏ rõ rệt đã xuất hiện, đồng thời ảnh thực tế của LED thể hiện màu đỏ sắc nét. Từ những kết quả này, có thể kết luận rằng, vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ có tiềm năng ứng dụng làm bột phát xạ đỏ trong các hệ thống WLED.



Hình 7. Phổ điện quang và ảnh LED của vật liệu chế tạo được phủ lên chip 395 nm.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, bột huỳnh quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ được chế tạo thành công thông qua phương pháp phản ứng pha rắn cải tiến với quy trình tổng hợp đơn giản, độ lặp cao và có tiềm năng mở rộng để chế tạo bột huỳnh quang. Các chất phát quang thu được có thể được kích thích hiệu quả bằng ánh sáng NUV ở bước sóng 394 nm để phát ra ánh sáng đỏ mạnh ở đỉnh 613 nm. Cường độ PL cao nhất đạt được đối với chất phát quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ được ủ ở 1300°C trong 5 giờ. Thử nghiệm thành công LED ánh sáng đỏ từ bột chế tạo và chip 395 nm. Những kết quả này cho thấy, $\text{MgGa}_2\text{O}_4:3\%\text{Eu}^{3+}$ có thể được sử dụng làm chất phát quang phát ra màu đỏ trong WLED dựa trên NUV. Trong nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi sẽ nghiên cứu tác động của nồng độ pha tạp Eu^{3+} đến đặc tính quang học của vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V.C. Bender, T.B. Marchesan, J.M. Alonso (2015), "Solid-state lighting: A concise review of the state of the art on LED and OLED modeling", *IEEE Ind. Electron.*, **9**, pp.6-16, DOI: 10.1109/MIE.2014.2360324.
- [2] J.R. Pryde, D.C. Whalley, W. Malalasekera (2014), "A review of LED technology trends and relevant thermal management strategies", *Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, DOI: 10.1109/ITHERM.2014.6892261.
- [3] E. Song, Y. Zhou, X.B. Yang, et al. (2017), "Highly efficient and stable narrow-band red phosphor $\text{Cs}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}^{4+}$ for high-power warm white LED applications", *ACS Photonics*, **4**, pp.2556-2565, DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b00852.
- [4] R. Cao, Q. Xiong, W. Luo, et al. (2015), "Synthesis and luminescence properties of efficient red phosphors $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Mn}^{4+}, \text{R}^+$ ($\text{R}^+=\text{Li}^+, \text{Na}^+$, and K^+) for white LEDs", *Ceram. Int.*, **41**, pp.7191-7196, DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.02.047.
- [5] M. Peng, X. Yin, P.A. Tanner, et al. (2013), "Orderly-layered tetravalent manganese-doped strontium aluminate $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{4+}$: An efficient red phosphor for warm white light emitting diodes", *J. Am. Ceram. Soc.*, **96**, pp.2870-2876, DOI: 10.1111/jace.12391.
- [6] Y. Zhydachevskii, A. Suchocki, A. Pajczkowska, et al. (2013), "Spectroscopic properties of Mn^{4+} ions in SrLaAlO_4 ", *Opt. Mater. (Amst.)*, **35**, pp.1664-1668, DOI: 10.1016/j.optmat.2013.04.028.
- [7] Q. Sai, C. Xia, H. Rao, et al. (2011), "Mn, Cr-co-doped MgAl_2O_4 phosphors for white LEDs", *J. Lumin.*, **131**, pp.2359-2364, DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.05.046.
- [8] B. Wang, H. Lin, J. Xu, et al. (2014), " $\text{CaMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{27}:\text{Mn}^{4+}$ -based red phosphor: A potential color converter for high-powered warm W-led", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, pp.22905-22913, DOI: 10.1021/am507316b.
- [9] L. Meng, L. Liang, Y. Wen (2015), "A novel red phosphor $\text{Na}^+, \text{Mn}^{4+}$ co-doped $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ for warm white light emitting diodes", *Mater. Chem. Phys.*, **153**, pp.1-4, DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.12.041.
- [10] Z. Wu, Z. Xia (2018), "Phosphors for white LEDs", *Handbook of Advanced Lighting Technology*, Elsevier Ltd, DOI: 10.1016/B978-0-08-101942-9.00005-8.
- [11] B.S. Tsai, Y.H. Chang, Y.C. Chen (2004), "Nanostructured red-emitting $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphors", *J. Mater. Res.*, **19**, pp.1504-1508, DOI: 10.1557/JMR.2004.0201.
- [12] M.H. Fang, G.N.A.D. Guzman, Z. Bao, et al. (2020), "Ultra-high-efficiency near-infrared $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ -phosphor and controlling of phytochrome", *J. Mater. Chem. C*, **8**, pp.11013-11017, DOI: 10.1039/d0tc02705g.
- [13] P.B. Devaraja, H. Nagabhushana, S.C. Sharma, et al. (2016), "Spectroscopic and photoluminescence properties of $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ nanosheets for WLEDs", *Displays*, **41**, pp.16-24, DOI: 10.1016/j.displa.2015.10.006.
- [14] Y.F. Liu, Z.P. Yang, Q.M. Yu (2011), "Preparation and its luminescent properties of $\text{AlPO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor for w-LED applications", *J. Alloys Compd.*, **509**, pp.L199-L202, DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.03.064.
- [15] M.T. Tran, N. Tu, N.V. Quang, et al. (2021), "Excellent thermal stability and high quantum efficiency orange-red-emitting $\text{AlPO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphors for WLED application", *J. Alloys Compd.*, **853**, DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156941.
- [16] J. Singh, J. Manam (2016), "Structural and spectroscopic behaviour of Eu^{3+} -doped SrGd_2O_7 modified by thermal treatments", *J. Mater. Sci.*, **51**, pp.2886-2901, DOI: 10.1007/s10853-015-9597-5.
- [17] C.K. Chaithra, B.R.R. Krushna, M.M. Gowri, et al. (2025), "Luminous thermal stability and versatile applications of red emitting $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ phosphor in W-LEDs, forensic science and security technologies", *J. Lumin.*, **282**, DOI: 10.1016/j.jlumin.2025.121220.
- [18] N.V. Quang, N.T. Huyen, N. Tu, et al. (2021), "A high quantum efficiency plant growth LED by using a deep-red-emitting $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ phosphor", *Dalt. Trans.*, **50**, pp.12570-12582, DOI: 10.1039/d1dt00115a.