

Chế tạo và nghiên cứu tính chất quang của vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp Cr^{3+}

Nguyễn Ánh Tuyết¹, Vũ Hồng Đăng¹, Trần Việt Hùng¹, Dương Thị Hảo Dung¹,
Ngô Mai Chi¹, Hoàng Minh Tuấn², Nguyễn Văn Quang^{1*}, Vũ Thị Kim Liên³

¹Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2, 32 Nguyễn Văn Linh, phường Xuân Hòa, tỉnh Phú Thọ, Việt Nam

²Sở Giáo dục và Đào tạo Phú Thọ, 1166 Hùng Vương, phường Thanh Miếu, tỉnh Phú Thọ, Việt Nam

³Trường Đại học Duy Tân, 254 Nguyễn Văn Linh, phường Thanh Khê, TP. Đà Nẵng, Việt Nam

Ngày nhận bài 1/4/2025; ngày chuyển phản biện 3/4/2025; ngày nhận phản biện 22/4/2025; ngày chấp nhận đăng 28/4/2025

Tóm tắt:

LED ánh sáng đỏ xa hiện đang được quan tâm nghiên cứu nhờ những tác động tích cực đến sự phát triển của cây trồng. Khi cây được chiếu sáng bằng ánh sáng đỏ xa, PFR sẽ hấp thụ ánh sáng này và chuyển hóa thành PR, từ đó kích thích sự sinh trưởng của cây. Trong nghiên cứu này, vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ phát xạ ánh sáng đỏ xa đã được tổng hợp bằng phương pháp khuếch tán nhiệt. Giảm đồ nhiễu xạ tia X cho thấy, ở nhiệt độ nung 1400°C , vật liệu thu được là đơn pha và có chất lượng tinh thể tốt. Ảnh hiển vi điện tử quét phát xạ trường cho thấy, vật liệu có kích thước hạt lớn ($1\text{-}3\ \mu\text{m}$). Phổ kích thích phát quang cho thấy, vật liệu hấp thụ mạnh trong vùng ánh sáng nhìn thấy, với hai đỉnh hấp thụ cực đại xung quanh bước sóng 415 và 574 nm. Dưới kích thích tại bước sóng 415 nm, vật liệu phát xạ ánh sáng đỏ mạnh với đỉnh phát xạ tại 707 nm, tương ứng với quá trình chuyển mức ${}^2\text{E}\rightarrow{}^4\text{A}_2$. Thử nghiệm LED sử dụng vật liệu này kết hợp với chip LED 430 nm đã được thực hiện thành công. Các kết quả thu được cho thấy, vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp Cr^{3+} là ứng viên tiềm năng cho việc chế tạo đèn LED phát xạ ánh sáng đỏ xa, hướng tới ứng dụng trong chiếu sáng nông nghiệp.

Từ khóa: LED ánh sáng đỏ xa, $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$, phản ứng pha rắn cải tiến.

Chỉ số phân loại: 2.4, 2.5, 4.1

Synthesis and research on optical properties of Cr^{3+} -doped MgGa_2O_4 phosphors

Anh Tuyen Nguyen¹, Hong Dang Vu¹, Viet Hung Tran¹, Thi Hao Dung Duong¹,
Mai Chi Ngo¹, Minh Tuan Hoang², Van Quang Nguyen^{1*}, Thi Kim Lien Vu³

¹Hanoi Pedagogical University 2, 32 Nguyen Van Linh Street, Xuan Hoa Ward, Phu Tho Province, Vietnam

²Phu Tho Department of Education and Training, 1166 Hung Vuong Street, Thanh Mieu Ward, Phu Tho Province, Vietnam

³Duy Tan University, 254 Nguyen Van Linh Street, Thanh Khe Ward, Da Nang City, Vietnam

Received 1 April 2025; revised 22 April 2025; accepted 28 April 2025

Abstract:

Far-red light-emitting diodes (LEDs) have attracted increasing attention due to their positive effects on plant growth. When plants are exposed to far-red light, phytochrome far-red (PFR) absorbs the radiation and is converted into phytochrome red (PR), thereby stimulating plant growth. In this study, a far-red-emitting $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ phosphor was synthesised using a thermal diffusion method. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that at a calcination temperature of 1400°C , the material forms a single phase with good crystalline quality. Field-emission scanning electron microscopy (FESEM) images showed that the material possesses relatively large grains, ranging from 1 to $3\ \mu\text{m}$ in size. Photoluminescence excitation (PLE) spectra revealed strong visible-light absorption, with two prominent peaks at approximately 415 and 574 nm. When excited at 415 nm, the material exhibited intense red emission, peaking at 707 nm, corresponding to the ${}^2\text{E}\rightarrow{}^4\text{A}_2$ transition. Furthermore, an LED experiment using this material in combination with a 430 nm LED chip was successfully conducted. These findings indicate that Cr^{3+} -doped MgGa_2O_4 is a promising candidate for far-red light-emitting LEDs in agricultural lighting applications.

Keywords: far red LED light, improved solid-state reaction, $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$.

Classification numbers: 2.4, 2.5, 4.1

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

1. Đặt vấn đề

Ánh sáng đóng vai trò quan trọng đối với sự phát triển của cây trồng [1, 2]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, diệp lục trong cây trồng hấp thụ ánh sáng xanh dương, đỏ và đỏ xa [1]. Với mong muốn cây trồng ra hoa, kết trái sớm người ta thường tăng thời gian chiếu sáng cho cây trồng bằng ánh sáng nhân tạo [3]. Ánh sáng nhân tạo kích thích ra hoa trái vụ thường sử dụng ánh sáng đỏ hoặc đỏ xa [3-7]. Hiện nay, người ta thường sử dụng đèn LED vì có nhiều ưu điểm nổi trội như: độ sáng cao, thân thiện môi trường và đặc biệt là tiết kiệm điện năng tiêu thụ [8, 9].

Các LED ánh sáng đỏ hoặc đỏ xa được chế tạo bằng cách phủ bột huỳnh quang phát xạ đỏ hoặc đỏ xa phủ trên các chip LED. Bột huỳnh quang sử dụng cho LED ánh sáng đỏ, đỏ xa hiện nay dựa trên các ion phát quang đất hiếm Eu^{3+} , Ce^{3+} ... [10, 11] hoặc ion của các nguyên tố chuyển tiếp Mn^{4+} , Cr^{3+} [12, 13] hoặc các chấm lượng tử [14, 15]. Trong đó, ion Cr^{3+} có cấu hình $3d^3$ dễ dàng được pha tạp vào các mạng nền khác nhau và cho phát xạ vùng khác nhau, từ đỏ đậm, đỏ xa đến hồng ngoại gần.

Mạng nền MgGa_2O_4 được tạo từ các oxide MgO , Ga_2O_3 là hợp chất bền, thân thiện môi trường, chúng có cấu trúc spinel với nhóm không gian $\text{Fd}3m$ là hệ tinh thể lập phương [5].

Theo tìm hiểu của chúng tôi, vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp Cr^{3+} được nghiên cứu chế tạo bằng phương pháp phản ứng pha rắn [5], tuy nhiên trong nghiên cứu này, sử dụng phản ứng pha rắn truyền thống, chưa thử nghiệm và đánh giá LED phát xạ đỏ xa [5].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo MgGa_2O_4 pha tạp Cr^{3+} bằng phương pháp phản ứng pha rắn cải tiến, kết hợp với thiêu kết ở nhiệt độ cao có quy trình đơn giản, độ lặp hóa học cao. Thử nghiệm chế tạo LED và đo thông số điện quang của LED.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Thực nghiệm

Vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp $0,5\%\text{Cr}^{3+}$ được tổng hợp dựa trên phương pháp phản ứng pha rắn truyền thống, sử dụng hoá chất gồm MgO , Ga_2O_3 và $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, nhóm đã cải tiến phản ứng pha rắn bằng cách trộn các tiền chất với nước và khuấy để các chất ban đầu được phân bố đều vào nhau, giúp quá trình phản

ứng dễ dàng hơn. Quy trình thực nghiệm được mô tả như sau: Cho hỗn hợp gồm $0,1773 \text{ g MgO}$ và $0,8239 \text{ g Ga}_2\text{O}_3$ trong cốc thuỷ tinh 100 ml , thêm 50 ml nước cất hai lần, khuấy đều, thêm tiếp 44 microlit dung dịch $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 1M ; nâng nhiệt độ 100°C tiếp tục khuấy đến cạn. Sấy mẫu trong tủ sấy ở 200°C trong 5 giờ , ở điều kiện nhiệt độ thường, nghiền đều mẫu bằng cối mã não. Nung mẫu ở 1400°C trong 5 giờ ở điều kiện thường, tốc độ nâng nhiệt $300^\circ\text{C}/\text{giờ}$, thu được vật liệu $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Bột huỳnh quang MgGa_2O_4 pha tạp $0,5\% \text{Cr}^{3+}$ sau khi chế tạo được khảo sát cấu trúc tinh thể bằng phép đo nhiễu xạ tia X (XRD) sử dụng thiết bị D8 Advance với nguồn bức xạ $\text{CuK}\alpha$. Hình thái bề mặt vật liệu được nghiên cứu bằng hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM) với thiết bị JEOL/JSM-7600F. Các tính chất quang của vật liệu được khảo sát bằng phương pháp đo phổ huỳnh quang (PL) và phổ kích thích huỳnh quang (PLE) sử dụng nguồn sáng Xenon, công suất 450 W , với độ mở khe 2 và 1 nm , thời gian $0,2\text{S}$. Đặc tính quang học của nguyên mẫu LED được khảo sát bằng máy quang phổ kế GS-1290-3 (Gamma Scientific, Mỹ) kết hợp với quả cầu tích phân. Các mẫu khảo sát được đo ở nhiệt độ phòng.

2.3. Quy trình chế tạo LED

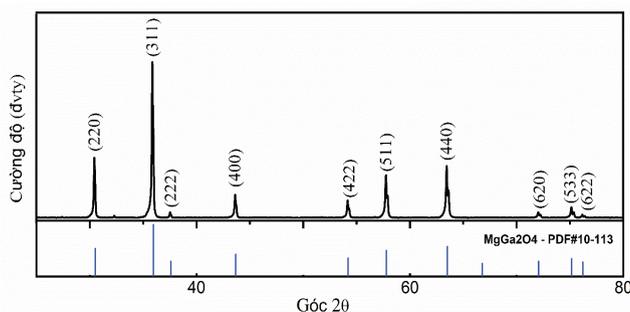
Trước tiên, dung dịch polydimethylsiloxane (PDMS) được điều chế bằng cách trộn đều chất đàn hồi và chất đóng rắn theo tỷ lệ $1:1$. Tiếp theo, một dung dịch trong suốt được tạo ra bằng cách phối trộn vật liệu phát quang đỏ $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ với dung dịch PDMS theo tỷ lệ $1:4$, sử dụng máy trộn hành tinh. Hỗn hợp thu được sau đó được phủ lên bề mặt của chip 430 nm bằng thiết bị phun định lượng. Cuối cùng, thiết bị được sấy trong lò ở nhiệt độ 150°C trong vòng 4 giờ để hoàn tất quá trình chế tạo.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Cấu trúc tinh thể của vật liệu

Để xác định rằng hợp chất tổng hợp đã được hình thành, cần phải xác định cấu trúc tinh thể của chúng và so sánh với tiêu chuẩn của vật liệu đã được công bố [5]. Cấu trúc tinh thể của vật liệu được xác định thông qua phép đo giản đồ nhiễu xạ tia X. Giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu MgGa_2O_4 pha tạp $0,5\% \text{Cr}^{3+}$ thiêu kết ở 1400°C , 5 giờ trong không khí được trình bày ở hình 1. Kết quả tại hình 1 cho thấy, vật liệu tồn tại các đỉnh nhiễu xạ có cường độ mạnh, đặc

trung cho cấu trúc spinel của pha tinh thể $MgGa_2O_4$ với nhóm không gian $Fd3m$ thuộc hệ tinh thể lập phương tại các góc $2\theta=18,55^\circ; 30,51^\circ; 35,96^\circ; 37,60^\circ; 43,69^\circ; 54,23^\circ; 57,81^\circ; 63,52^\circ; 66,79^\circ; 72,08^\circ; 75,18^\circ$ và $76,21^\circ$ ứng với các mặt phẳng (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511), (440), (531), (620), (533), (622) và phù hợp với thẻ chuẩn (PDF#10-0113- $MgGa_2O_4$) [10]. Điều này chứng tỏ vật liệu $MgGa_2O_4$ đã hình thành và chất lượng tinh thể tốt ở $1400^\circ C$. Ở nhiệt độ nung mẫu $1400^\circ C$ chỉ quan sát thấy đỉnh nhiễu xạ của tinh thể $MgGa_2O_4$, không thấy xuất hiện pha tinh thể nào khác, chứng tỏ vật liệu chế tạo được là đơn pha. Kết quả giản đồ nhiễu xạ tia X cũng cho thấy, ở nhiệt độ $1400^\circ C$ không xuất hiện pha tinh thể của Cr_2O_3 , điều này gián tiếp khẳng định ion Cr^{3+} đã thay thế ion Ga^{3+} trong mạng nền tinh thể $MgGa_2O_4$. Từ kết quả này chứng tỏ, chúng tôi đã chế tạo thành công bột huỳnh quang $MgGa_2O_4$ đơn pha và ion Cr^{3+} đã thay thế ion Ga^{3+} trong mạng nền $MgGa_2O_4$.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu $MgGa_2O_4$ pha tạp Cr^{3+} 0,5% được ủ nhiệt ở $1400^\circ C$, 5 giờ trong không khí.

Để nghiên cứu sự thay thế Cr^{3+} vào vị trí của ion Mg^{2+} hay vị trí của Ga^{3+} trong mạng nền $MgGa_2O_4$ chúng tôi tính giá trị sai lệch D_r , D_r có giá trị nhỏ hơn 30% mới có khả năng thay thế, và D_r càng nhỏ khả năng thay thế càng dễ [16].

$$D_r = \frac{R_h(CN) - R_d(CN)}{R_h(CN)} \quad (1)$$

trong đó, R_h và R_d tương ứng bán kính của ion được thay thế trong mạng nền và ion pha tạp; CN là số phối trí. Bán kính của các ion $Mg^{2+}=0,72 \text{ \AA}$; $Ga^{3+}=0,62 \text{ \AA}$; $Cr^{3+}=0,615 \text{ \AA}$ [5], dựa vào công thức (1) tính được D_r ở bảng 1.

Bảng 1. Giá trị tỷ lệ phần trăm sai lệch (D_r) khi Cr^{3+} thay thế các ion trong mạng nền.

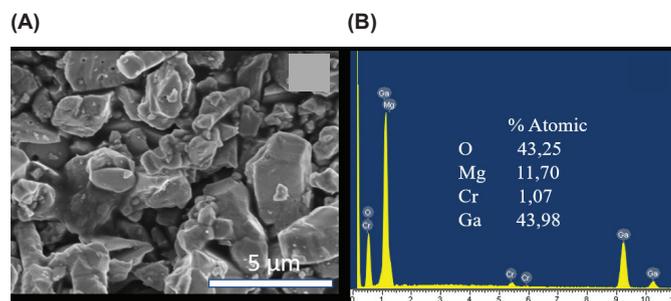
	Ga^{3+}	Mg^{2+}
D_r	0,81%	14,58%

Từ giá trị bảng 1, khi ion Cr^{3+} thay thế ion Ga^{3+} trong mạng nền có giá trị phần trăm sai lệch nhỏ nhất và nhỏ hơn rất nhiều 30%, nên ion Cr^{3+} ưu tiên thay thế Ga^{3+} trong mạng nền [16].

3.2. Hình thái bề mặt và thành phần hóa học của vật liệu

Hình thái bề mặt cho biết, vật liệu có hình dạng như thế nào và cho biết kích thước của vật liệu. Phân tích thành phần hóa học khẳng định thành phần nguyên tố trong vật liệu, giúp xác định vật liệu chế tạo được có tinh khiết hay lẫn tạp chất khác.

Hình 2A là hình thái bề mặt của vật liệu $MgGa_2O_4$ pha tạp Cr^{3+} , được ủ nhiệt ở $1400^\circ C$, 5 giờ trong không khí. Kết quả trên hình 2A cho thấy, vật liệu thu được dạng hạt, có biên độ rõ ràng, kích thước trung bình từ 1 đến 3 μm . Kết quả hình 2B là kết quả phân tích thành phần hóa học của vật liệu $MgGa_2O_4$ pha tạp Cr^{3+} , kết quả cho thấy vật liệu chỉ chứa các nguyên tố Mg, Ga, O và Cr mà không xuất hiện các nguyên tố khác, điều này cho thấy vật liệu thu được tinh khiết.

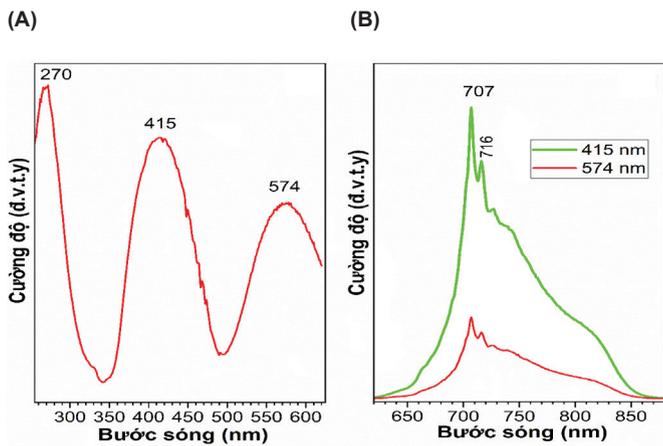


Hình 2. Hình thái bề mặt (A) và thành phần hóa học (B) của vật liệu $MgGa_2O_4$ pha tạp Cr^{3+} 0,5%.

3.3. Tính chất quang của vật liệu

Phổ kích thích huỳnh quang và phổ phát xạ huỳnh quang của vật liệu $MgGa_2O_4$ pha tạp Cr^{3+} thiêu kết ở $1400^\circ C$ trong 5 giờ trong không khí được trình bày ở hình 3. Kết quả phổ trong hình 3A cho thấy, khi bị kích thích ở bước sóng 707 nm, vật liệu thể hiện hai dải kích thích trong khoảng 350-490 nm và 500-600 nm, với các cực đại lần lượt tại bước sóng 415 nm và 574 nm. Dải kích thích quan sát được tại 415 nm là do quá trình chuyển mức năng lượng $^4A_2(^4F) \rightarrow ^4T_1(^4F)$ [5, 17], trong khi đỉnh hấp thụ tại 574 nm là do quá trình chuyển mức $^4A_2(^4F) \rightarrow ^4T_2(^4F)$. Ngoài ra, vật liệu còn hấp thụ mạnh tại bước sóng 270 nm, đỉnh này được gán cho các chuyển tiếp spin-cho phép $^4A_2(^4F) \rightarrow ^4T_1(^4P)$ [5, 17]. Kết quả nhận được tương đồng với công bố trước đó [5, 17].

Hình 3B phổ huỳnh quang của vật liệu khi kích thích ở bước sóng 415 nm cho thấy, vùng phát xạ đỏ - đỏ xa trong khoảng từ 600-850 nm, đạt cực đại tại 707 nm, do bước chuyển ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ bị cấm quay và cho phép spin của Cr^{3+} , và dải phát xạ tại 716 nm được quy cho quá trình chuyển đổi mức năng lượng ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ cấm quay và cho phép spin của Cr^{3+} [5, 8, 17, 18]. Ngoài ra, kích thích bởi bước sóng 415 nm cho cường độ phát xạ mạnh hơn so với khi kích thích bởi bước sóng 574 nm. Từ những kết quả này càng khẳng định rằng ion Cr^{3+} đã thay thế vào mạng nền $MgGa_2O_4$. Như vậy, chúng tôi chế tạo thành công vật liệu $MgGa_2O_4:Cr^{3+}$ bằng pha rắn cải tiến, giúp quá trình hình thành tinh thể dễ dàng hơn, phân bố hạt cũng đồng đều thể hiện qua hình ảnh FESEM. Quy trình này có thể chế tạo mẫu với số lượng lớn/mẻ, độ lặp cao, có tiềm năng sản xuất quy mô lớn và ứng dụng trong thực tiễn.



Hình 3. (A) Phổ kích thích huỳnh quang, (B) phổ huỳnh quang của vật liệu $MgGa_2O_4:0,5\% Cr^{3+}$ ủ nhiệt ở $1400^\circ C$, 5 giờ trong không khí.

Cấu hình lớp ngoài của ion Cr^{3+} là $3d^3$ chưa được điền đầy, do đó tồn tại một số mức năng lượng thấp tạo ra các chuyển đổi quang học. Các mức năng lượng của Cr^{3+} trong trường tinh thể của mạng nền $MgGa_2O_4$ được thể hiện trên giản đồ Tanabe-Sugano trong hình 4.

Trạng thái ${}^4A_{2g}$ có năng lượng thấp nhất (gọi là trạng thái cơ bản). Các mức ${}^2T_{1g}$ và 2E_g có năng lượng gần như không đổi, trong khi đó các mức năng lượng ${}^2A_{1g}$, ${}^4T_{1g}$ và ${}^4T_{2g}$ phụ thuộc mạnh vào giá trị D_q/B , trong đó D_q là thông số trường tinh thể và B là thông số Racah. Tỷ số $D_q/B > 2,2$ khi Cr^{3+} trong trường tinh thể mạnh và $D_q/B < 2,2$ trong trường tinh thể yếu [4, 7].

Thông số D_q được xác định theo công thức (1):

$$D_q = \frac{E({}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g})}{10} \quad (2)$$

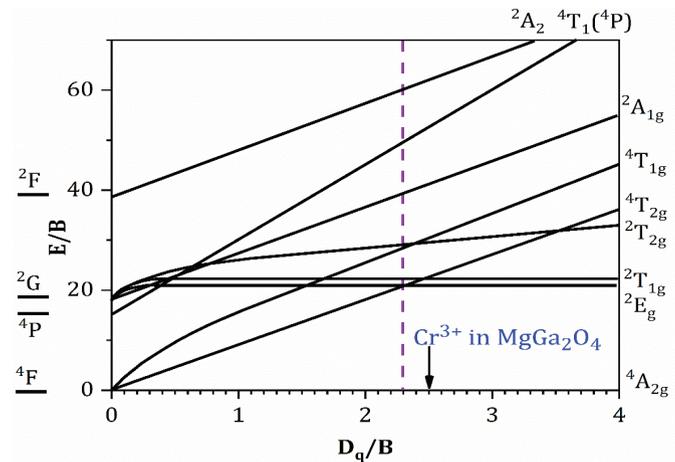
Hằng số Racah tính theo công thức (2):

$$\frac{D_q}{B} = \frac{15(x-8)}{x^2-10x} \quad (3)$$

Với:

$$x = \frac{E({}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{1g}) - E({}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g})}{D_q} \quad (4)$$

trong đó, $E({}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g})$ và $E({}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{1g})$ lần lượt là năng lượng của chuyển dời kích thích ${}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g}$ và ${}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{1g}$. Dựa vào phổ kích thích trên (hình 3) và các công thức (2-4) thông số mạng tinh thể tính toán được lần lượt là $D_q = 1745,2 \text{ cm}^{-1}$, $B = 654,25 \text{ cm}^{-1}$, $D_q/B = 2,66$. Ta thấy $D_q/B > 2,2$ chứng tỏ rằng, ion Cr^{3+} được định xứ trong trường tinh thể mạnh của mạng nền $MgGa_2O_4$ nên phổ phát xạ Cr^{3+} dạng vạch hẹp.

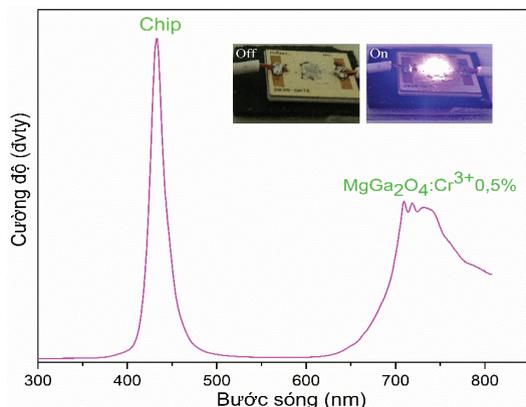


Hình 4. Giản đồ Tanabe-Sugano biểu hiện các mức năng lượng của ion Cr^{3+} trong trường tinh thể của mạng nền $MgGa_2O_4$.

3.4. Thử nghiệm chế tạo LED

Để nghiên cứu khả năng ứng dụng của bột huỳnh quang đã chế tạo, chúng tôi đã tiến hành phủ mẫu bột $MgGa_2O_4$ pha tạp $0,5\% Cr^{3+}$, được thiêu kết ở $1400^\circ C$ trong 5 giờ, lên chip LED 430 nm. Nguồn điện sử dụng cho LED là nguồn một chiều với các thông số tương ứng là 9 V, 150 mA. Hình 5 thể hiện phổ điện quang của chip kết hợp với bột huỳnh quang và ảnh thực tế của LED. Kết quả thu được từ hình 5 cho thấy, khi sử dụng chip 430 nm và phủ bằng vật liệu này,

đã xuất hiện vùng phát xạ đỏ xa và ảnh LED quan sát được có màu đỏ. Kết quả này cho thấy tiềm năng của vật liệu trong việc chế tạo LED phát xạ ánh sáng đỏ xa, hướng tới ứng dụng trong chiếu sáng nông nghiệp.



Hình 5. Phổ điện quang và đèn LED chế tạo khi phủ bột $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ lên chip LED 430 nm.

4. Kết luận

Bằng phương pháp phản ứng pha rắn cải tiến, chúng tôi đã chế tạo thành công bột huỳnh quang $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$. Bằng giản đồ nhiễu xạ tia X cho thấy, vật liệu đã hình thành và đơn pha ở nhiệt độ nung 1400°C , 5 giờ trong không khí, hình ảnh FESEM cho thấy ở nhiệt độ nung mẫu này, kích thước hạt $\sim 1-3 \mu\text{m}$. Bột huỳnh quang chế tạo được cho phát xạ đỏ đậm đến đỏ xa, với bước sóng phát xạ cực đại ở đỉnh 707nm và hấp thụ ở hai vùng $350-490 \text{ nm}$; $500-600 \text{ nm}$ và đạt cực đại ở bước sóng 415 và 574 nm . Kết quả tính $Dq/B=2,66$ chứng tỏ ion Cr^{3+} chịu tác dụng trường tinh thể mạnh trong mạng nền MgGa_2O_4 . Thử nghiệm chế tạo được LED phát xạ đỏ đậm - đỏ xa trên cơ sở bột $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ và chip LED 430 nm .

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2 qua Đề tài có mã số SV.2024.HPU2.05. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R.B. Peterson, V. Oja, A. Laisk (2001), "Chlorophyll fluorescence at 680 and 730 nm and leaf photosynthesis", *Photosynth. Res.*, **70**, pp.185-196, DOI: 10.1023/A:1017952500015.

[2] N.V. Quang, H.Q. Bac, D.T.T. Huyen, 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.

[3] N.T. Huyen, M.T. Tran, N.V. Quang, et al. (2022), "Far-red-emitting Cr^{3+} -doped $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ phosphors with excellent color purity and good quantum efficiency for plant growth LEDs", *Opt. Mater. (Amst.)*, **133**, DOI: 10.1016/j.optmat.2022.113002.

[4] K.T. Thu, N. Tu, D.Q. Trung, et al. (2024), "Harnessing the brilliance of Cr^{3+} doped $\text{LaAlO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ phosphors with exceptional responsiveness to far-red phytochrome for plant growth LEDs", *Ceram. Int.*, **50**, pp.27064-27079, DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.05.003.

[5] Y. Zhao, J. Du, X. Wu, et al. (2020), "Enhanced near-infrared persistent luminescence in $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ through codoping", *J. Lumin.*, **220**, DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117035.

[6] N.T.K. Chi, N.V. Quang, N.T. Tuan, et al. (2019), "Deep red emitting $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ phosphor for solid state lighting", *J. Electron. Mater.*, **48**, pp.5891-5899, DOI: 10.1007/s11664-019-07358-5.

[7] M.T. Tran, D.Q. Trung, N. Tu, et al. (2021), "Single-phase far-red-emitting $\text{ZnAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ phosphor for application in plant growth LEDs", *J. Alloys Compd.*, **884**, pp.1-13, DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161077.

[8] Z. Wu, Z. Xia (2018), *Phosphors for White LEDs*, Elsevier Ltd, DOI: 10.1016/B978-0-08-101942-9.00005-8.

[9] 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 (ITherm)*.

[10] 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.

[11] L. Mancic, V. Lojpur, I. Barosso, et al. (2012), "Synthesis of cerium-activated yttrium aluminate based fine phosphors by an aerosol route", *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2012**, pp.2716-2724, DOI: 10.1002/ejic.201101053.

[12] S.X. Liu, F.B. Xiong, H.F. Lin, et al. (2018), "A deep red-light-emitting phosphor $\text{Mn}^{4+}:\text{CaAl}_4\text{O}_7$ for warm white LEDs", *Optik (Stuttg.)*, **170**, pp.178-184, DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.05.127.

[13] L. Meng, L. Liang, Y. Wen (2015), "A novel red phosphor Na^+ , Mn^{4+} co-doped $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}$ for warm white light emitting diodes", *Mater. Chem. Phys.*, **153**, pp.1-4, DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.12.041.

[14] J.H. Song, T.P. Nguyen, D.K. Nguyen, et al. (2024), "Hydrothermal synthesis of CdTe quantum dots using ammonia as a reducing agent", *HPU2 J. Sci. Nat. Sci. Technol.*, **3**, pp.3-9, DOI: 10.56764/hpu2.jos.2024.3.2.3-9 (in Vietnamese).

[15] T.H.D. Thi, D.N. Cao, T.H. Nguyen, et al. (2023), "Control the solubility of carbon quantum dots by solvent engineering", *HPU2 J. Sci. Nat. Sci. Technol.*, **2**, pp.51-58, DOI: 10.56764/hpu2.jos.2023.2.3.51-58 (in Vietnamese).

[16] L. Shi, Y.J. Han, Z.G. Zhang, et al. (2019), "Synthesis and photoluminescence properties of novel $\text{Ca}_2\text{LaSbO}_6:\text{Mn}^{4+}$ double perovskite phosphor for plant growth LEDs", *Ceram. Int.*, **45**, pp.4739-4746, DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.11.166.

[17] X. Yu, X. Yang, J. Huan, et al. (2024), "Intense NIR mechanoluminescence from Al^{3+} -regulated $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ ", *Chem. Eng. J.*, **491**, DOI: 10.1016/j.cej.2024.152155.

[18] S. Yu, S. Fang, L. Zhao, et al. (2023), "Self-recoverable and cyclically stable near-infrared mechanoluminescence for dual-mode mechanics visualisation and biomechanics detection", *Chem. Eng. J.*, **474**, DOI: 10.1016/j.cej.2023.145542.