

## EFFECT OF $\text{Eu}^{3+}$ ION DOPING CONCENTRATION ON THE STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF LSTO FLUORESCENT POWDERS PREPARED BY SOLID-STATE REACTION METHOD

Tran Quoc Xuan<sup>1</sup>, Le Thi Phuong<sup>2</sup>, Tran Thi Thu Trang<sup>3\*</sup>, Le Tien Ha<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dong Thanh High School, <sup>2</sup>Dong Trieu High School, <sup>3</sup>Ha Long University, <sup>4</sup>TNU - University of Sciences

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<b>Received:</b> 24/10/2024	LSTO fluorescent powder doped with $\text{Eu}^{3+}$ ions with 1 to 6% concentrations by solid-state reaction method at 1200 °C. The obtained material is a multiphase structure with main phases $\text{La}_2\text{SrTiO}_6$ , $\text{SrTiO}_3$ and $\text{La}_2\text{O}_3$ , with an average size from 3 to 4 $\mu\text{m}$ , with the structure almost independent of Eu doping concentration. The obtained material strongly absorbs in the ultraviolet and visible regions with characteristic absorption peaks of LSTO substrate material with CTB band at 288 nm and fluorescence excitation peaks of $\text{Eu}^{3+}$ ions at positions 361, 375, 384, 395, 402, 414, 465, 474, 526 and 536 nm. The material gives the best emission when excited at 395 nm, corresponding to the energy level transition of $\text{Eu}^{3+}$ ion from the ground state $^7\text{F}_0$ to the state $^5\text{L}_6$ . When excited at 395 nm, the fluorescent powder emits strongly in the red-orange region, with an emission band from 575 to 725 nm, this emission band is the state transition of $\text{Eu}^{3+}$ ion from $^5\text{D}_0$ to $^7\text{F}_j$ ( $j = 0, 1, 2, 3, 4$ ). The phenomenon of fluorescence quenching due to the concentration of the material system is observed at 5% Eu. The obtained fluorescent powder has potential applications in improving the quality of WLEDs when using nUV-LED chips with an emission wavelength of 395 nm.
<b>Revised:</b> 26/11/2024	
<b>Published:</b> 26/11/2024	

### KEYWORDS

$\text{La}_2\text{SrTiO}_6$   
Perovskite  
Fluorescent materials  
Eu-doped fluorescent materials  
ion  $\text{Eu}^{3+}$

## ẢNH HƯỞNG CỦA NỒNG ĐỘ ION $\text{Eu}^{3+}$ ĐẾN CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT QUANG CỦA BỘT HUỖNH QUANG LSTO ĐƯỢC CHẾ TẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẢN ỨNG PHA RẮN

Trần Quốc Xuân<sup>1</sup>, Lê Thị Phương<sup>2</sup>, Trần Thị Thu Trang<sup>3\*</sup>, Lê Tiến Hà<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Trường THPT Đông Thành, <sup>2</sup>Trường THPT Đông Triều

<sup>3</sup>Trường Đại học Hạ Long, <sup>4</sup>Trường Đại học Khoa học – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<b>Ngày nhận bài:</b> 24/10/2024	Bột huỳnh quang LSTO pha tạp ion $\text{Eu}^{3+}$ với nồng độ từ 1 đến 6%, bằng phương pháp phản ứng pha rắn ở nhiệt độ 1200 °C. Vật liệu thu ở dạng đa pha cấu trúc với các pha chính $\text{La}_2\text{SrTiO}_6$ , $\text{SrTiO}_3$ và $\text{La}_2\text{O}_3$ , có kích thước trung bình từ 3 đến 4 $\mu\text{m}$ , có cấu trúc gần như không phụ thuộc vào nồng độ pha tạp Eu. Vật liệu thu được hấp thụ mạnh trong vùng tử ngoại và vùng khả kiến với các đỉnh hấp thụ đặc trưng của vật liệu nền LSTO với giải CTB ở vị trí 288 nm và các đỉnh kích thích huỳnh quang của ion $\text{Eu}^{3+}$ ở các vị trí 361, 375, 384, 395, 402, 414, 465, 474, 526 và 536 nm. Vật liệu cho phát xạ tốt nhất khi kích thích ở bước sóng 395 nm, tương ứng với quá trình chuyển mức năng lượng của ion $\text{Eu}^{3+}$ từ trạng thái cơ bản $^7\text{F}_0$ lên trạng thái $^5\text{L}_6$ . Khi kích thích ở bước sóng 395 nm bột huỳnh quang phát xạ mạnh trong vùng đỏ - cam, với dải phát xạ từ 575 đến 725 nm, dải phát xạ này là quá trình dịch chuyển trạng thái của ion $\text{Eu}^{3+}$ từ $^5\text{D}_0$ về $^7\text{F}_j$ ( $j = 0, 1, 2, 3, 4$ ). Hiện tượng dập tắt huỳnh quang do nồng độ của hệ vật liệu được quan sát thấy ở tỷ lệ 5%Eu. Bột huỳnh quang thu được có tiềm năng ứng dụng trong việc cải thiện chất lượng của các WLED khi dùng chip nUV-LED với bước sóng phát xạ 395 nm.
<b>Ngày hoàn thiện:</b> 26/11/2024	
<b>Ngày đăng:</b> 26/11/2024	

### TỪ KHÓA

$\text{La}_2\text{SrTiO}_6$   
Perovskite  
Vật liệu huỳnh quang  
Vật liệu huỳnh quang pha tạp Eu  
ion  $\text{Eu}^{3+}$

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11395>

\* Corresponding author. Email: tranthithutrang@daihochalong.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Trong những thập niên gần đây, đèn LED đã trở nên phổ biến và thay thế các thiết bị chiếu sáng truyền thống như đèn sợi đốt, đèn huỳnh quang và huỳnh quang compact bởi chúng có những đặc điểm nổi trội so với các đèn truyền thống như có hiệu suất lượng tử cao, độ bền cơ, nhiệt cao, có tuổi thọ lớn hơn rất nhiều so với những đèn truyền thống và tiết kiệm năng lượng [1]–[3].

Trong chiếu sáng dân dụng người ta thường sử dụng đèn LED phát xạ ánh sáng trắng (WLED). Hiện nay, WLED thương mại được chế tạo bằng cách phủ lên chip LED phát xạ xanh dương (blue LED) một lớp bột huỳnh quang phát xạ vàng (YAG:Ce<sup>3+</sup>), hoặc phủ bột huỳnh quang 3 màu lên chip LED phát xạ cận tử ngoại (NUV-LED) [4]–[8]. Với các WLED chế tạo bằng phương pháp này thường có chỉ số hoàn màu thấp (CRI < 80) và nhiệt độ màu cao do dải phát xạ thiếu hụt thành phần đỏ. Để khắc phục nhược điểm này, người ta thường bổ sung vào phổ phát xạ của đèn bằng các loại bột phát xạ mạnh trong vùng ánh sáng đỏ [9]–[12]. Việc bổ sung ánh sáng đỏ là cần thiết để nâng cao chất lượng của WLED.

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy bột huỳnh quang trên nền vật liệu có cấu trúc perovskite và perovskite kép khi pha tạp Eu [13]–[15] hoặc một số kim loại chuyển tiếp như Mn [16]–[22] cho phát xạ mạnh trong vùng ánh sáng đỏ, có thể cải thiện được chất lượng của các thiết bị WLED khi sử dụng chip nUV – LED. Đồng thời khi sử dụng các loại bột huỳnh quang này có thể ứng dụng để tráng trên các thiết bị chiếu sáng cho cây trồng.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã tổng hợp vật liệu LSTO pha tạp ion Eu<sup>3+</sup> bằng phương pháp phản pha rắn, ở nhiệt độ 1200 °C, với nồng độ pha tạp ion Eu<sup>3+</sup> thay đổi từ 1 – 6%. Ảnh hưởng của nồng độ pha tạp ion Eu<sup>3+</sup> đến cấu trúc và tính chất quang của vật liệu đã được chúng tôi phân tích và khảo sát.

## 2. Thực nghiệm

### 2.1. Thực nghiệm chế tạo

Bột huỳnh quang LSTO pha tạp ion Eu<sup>3+</sup> với nồng độ pha tạp từ 1 đến 6% được tổng hợp bằng phương pháp phản ứng pha rắn, với các tiền chất ban đầu La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; SrO; TiO<sub>2</sub> và Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> của Merck với độ sạch 99,9%. Ban đầu các mẫu được nung sơ bộ ở 800 °C và sau đó nghiên cứu lần 2 rồi nung thiêu kết ở nhiệt độ 1200 °C trong 24 giờ.

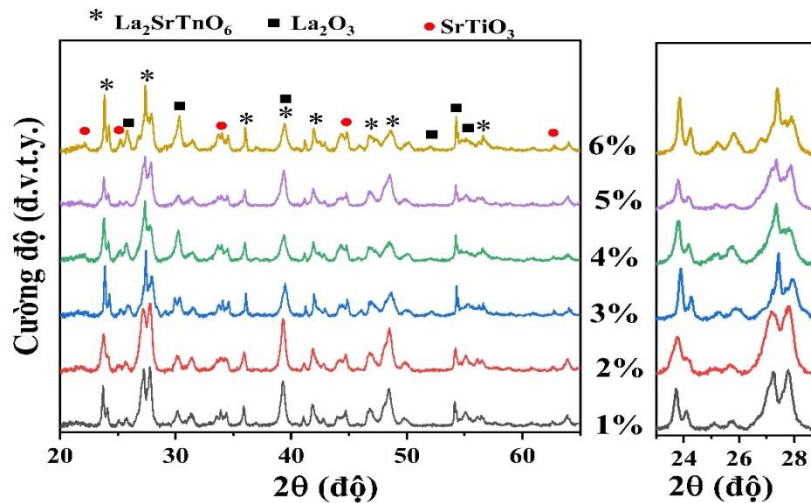
### 2.2. Thực nghiệm đo đạc

Vật liệu sau khi được tổng hợp đã được chúng tôi tiến hành khảo sát cấu trúc tinh thể bằng phép phân tích giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) dựa trên hệ đo D2-Phaser (Bruker, K $\alpha$ Cu = 1,54060 Å). Hình thái bề mặt của các mẫu được quan sát bằng ảnh hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM) dựa trên thiết bị FESEM-JEOL/JSM-7600F. Phổ huỳnh quang (PL) và phổ kích thích huỳnh quang (PLE) được phân tích bằng thiết bị F1000 của hãng Edinburch, với nguồn kích là đèn Xenon có công suất 450 W.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Khảo sát cấu trúc

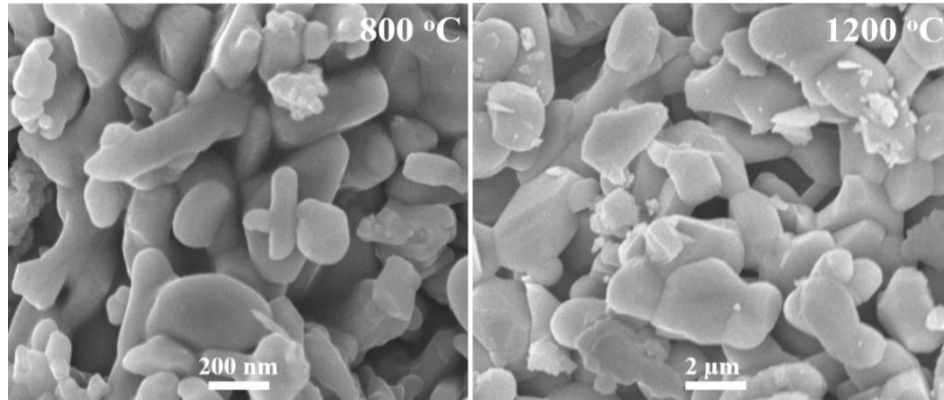
Hình 1 là giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu LSTO nung thiêu kết ở nhiệt độ 1200 °C với nồng độ pha tạp ion Eu<sup>3+</sup> từ 1 đến 6%. Kết quả nghiên cứu cho thấy, vật liệu thu được là vật liệu đa pha cấu trúc, với các cấu trúc chính gồm La<sub>2</sub>SrTiO<sub>6</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub> (LSTO) với tỷ lệ pha cấu trúc La<sub>2</sub>SrTiO<sub>6</sub> chiếm tỷ lệ lớn trong vật liệu. Pha cấu trúc này thuộc cấu trúc perovskite kép thuộc nhóm không gian P121/n [13], [17], [23], với các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng (1 1 0), (1 1 2), (2 2 0), (3 1 0), (1 3 2), (4 0 0) và (1 1 6) ở các vị trí 2 $\theta$  23,67; 27,41; 39,32; 48,03; 54,20; 63,68 và 69,54 của pha cấu trúc La<sub>2</sub>SrTiO<sub>6</sub>. Các đỉnh nhiễu xạ này phù hợp với thẻ chuẩn (JCPDS No. 70-4252) đối với mạng nền La<sub>2</sub>MgTiO<sub>6</sub> [23] có tính tương đồng.



**Hình 1.** Giải đồ nhiễu xạ tia X của mẫu LSTO nung ở 1200 °C với nồng độ Eu khác nhau

Các đỉnh nhiễu xạ còn lại có cường độ bé hơn của các pha cấu trúc  $\text{La}_2\text{O}_3$  và  $\text{SrTiO}_3$  phù hợp với các thẻ chuẩn (JCPDS No. 73-2141) [24], [25] và (JCPDS no: 35-0734) [26]–[28]. Sự hình thành các pha này được cho là quá trình tổng hợp vật liệu chưa đạt được nhiệt độ tối ưu để có thể tổng hợp được vật liệu đơn pha cấu trúc. Đồng thời kết quả chỉ ra rằng khi thay đổi nồng độ pha tạp ion  $\text{Eu}^{3+}$  không làm thay đổi cấu trúc tinh thể của vật liệu. Điều này cho thấy ion  $\text{Eu}^{3+}$  đã thay thế tốt vào vị trí của ion  $\text{La}^{3+}$  bởi hai ion này có bán kính xấp xỉ nhau. Bán kính ion của  $\text{Eu}^{3+}$  là 0,947 Å, bán kính ion của  $\text{La}^{3+}$  là 1,045 Å trong khi đó bán kính ion  $\text{Sr}^{2+}$  (0,74 Å) và  $\text{Ti}^{4+}$  (0,61 Å) [13].

### 3.2. Hình thái bề mặt và kích thước hạt của vật liệu



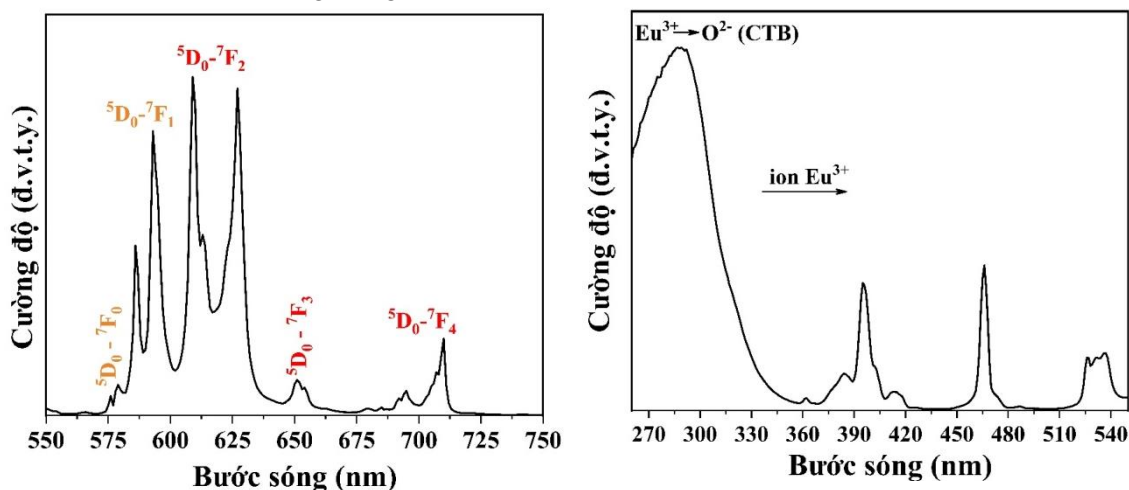
**Hình 2.** Ảnh FESEM của mẫu LSTO pha tạp 1% ion  $\text{Eu}^{3+}$  nung ở nhiệt độ 800 và 1200 °C

Để khảo sát hình thái bề mặt của vật liệu LSTO pha tạp ion 1% ion  $\text{Eu}^{3+}$ , chúng tôi đã tiến hành chụp ảnh FESEM của hai mẫu ở chế độ nung sơ bộ 800 °C và mẫu nung thiêu kết ở 1200 °C. Kết quả trên Hình 2 cho thấy với mẫu nung sơ bộ ở 800 °C, kích thước hạt phân bố trung bình khoảng 150 nm đến 250 nm, còn mẫu nung thiêu kết ở 1200 °C thì kích thước hạt phân bố trung bình khoảng 3 μm. Kết quả này cho thấy khi nung ở 1200 °C thì kích thước hạt tăng lên do quá trình kết tinh theo nhiệt độ. Do đó, có thể nói rằng bột huỳnh quang mà chúng tôi chế tạo được có kích thước khá phù hợp cho ứng dụng phủ lên các chip LED trong các thiết bị chiếu sáng.

### 3.3. Tính chất quang của vật liệu

Để khảo sát tính chất quang của vật liệu, chúng tôi đã tiến hành đo phổ huỳnh quang (PL) tại 395 nm và kích thích huỳnh quang (PLE) tại 609 nm của mẫu LSTO pha tạp 5%  $\text{Eu}^{3+}$ , nung ở

nhệt độ 1200 °C, trong môi trường không khí, với thời gian nung 24 giờ, bước sóng kích thích 395 nm. Kết quả phổ PL trên hình Hình 3 cho thấy vật liệu phát xạ mạnh trong vùng đỏ từ 575 nm đến 725 nm, với các đỉnh phát xạ đặc trưng của ion  $\text{Eu}^{3+}$  khi chuyển từ trạng thái kích thích  $^5\text{D}_0$  về trạng thái  $^7\text{F}_j$  ( $j = 0, 1, \dots$ ) [13], [29]. Trong các dải phát xạ này thì vùng phát xạ trong khoảng 605 đến 635 nm có cường độ lớn nhất, dải phát xạ này được quy cho quá trình chuyển mức năng lượng từ trạng thái  $^5\text{D}_0$  về trạng thái  $^7\text{F}_2$  của ion  $\text{Eu}^{3+}$ . Đây là trạng thái dịch chuyển lưỡng cực điện được ưu tiên trong mạng nền vật liệu LSTO. Những đỉnh phát xạ còn lại có cường độ nhỏ hơn vì quá trình dịch chuyển mức năng lượng bị cấm bởi quy tắc lọc lựa trạng thái của ion  $\text{Eu}^{3+}$  trong trường tinh thể của vật liệu. Kết quả nghiên cứu này cho thấy ion  $\text{Eu}^{3+}$  đã thay thế vào vị trí của ion  $\text{La}^{3+}$  trong mạng nền của vật liệu  $\text{La}_2\text{SrTiO}_6$  [13]–[15], [29].



**Hình 3.** Phổ PL của bột LSTO pha tạp ion 5%  $\text{Eu}^{3+}$  nung ở nhiệt độ 1200 °C, đo ở nhiệt độ phòng

**Hình 4.** Phổ PLE đo tại bước sóng 609 nm của mẫu LSTO:5%  $\text{Eu}^{3+}$  nung 1200 °C đo ở nhiệt độ phòng

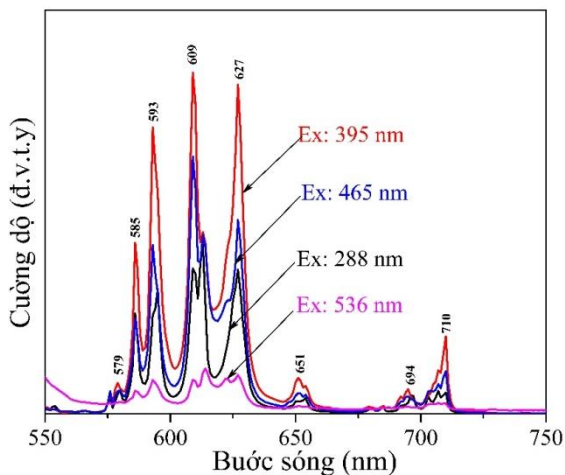
Để xác định nguồn gốc của các quá trình hấp thụ của vật liệu và đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu trong các thiết bị chiếu sáng, chúng tôi đã tiến hành đo phổ kích thích huỳnh quang (PLE) tại bước sóng 609 nm của bột huỳnh quang LSTO pha tạp 5% ion  $\text{Eu}^{3+}$  ở nhiệt độ phòng, và kết quả được trình bày trên Hình 4. Kết quả chỉ ra rằng, vật liệu hấp thụ mạnh trong vùng tử ngoại đến vùng xanh dương, với các đỉnh kích thích huỳnh quang ở các vị trí 361, 375, 384, 395, 402, 414, 465, 474, 526, 536 nm và một dải hấp thụ rộng ở vùng 288 nm. Dải kích thích rộng trong vùng tử ngoại với đỉnh 288 nm được cho là do quá trình chuyển mức điện tử từ ion  $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{O}^{2-}$  (CTB) của mạng nền LSTO.

Các đỉnh sắc nét còn lại là quá trình hấp thụ của ion  $\text{Eu}^{3+}$  từ các trạng thái có năng lượng thấp  $^7\text{F}_j$  ( $j = 0 - 4$ ) lên các trạng thái năng lượng cao hơn. Các quá trình dịch chuyển này gồm:  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_4$  (361 nm),  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{G}_4$  (375 nm),  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{G}_2$  (384 nm),  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{L}_6$  (395 nm),  $^7\text{F}_1 \rightarrow ^5\text{L}_6$  (402 nm),  $^7\text{F}_1 \rightarrow ^5\text{D}_3$  (414 nm),  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_2$  (465 nm),  $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_1$  (526 nm) và  $^7\text{F}_1 \rightarrow ^5\text{D}_1$  (536 nm) [13], [29].

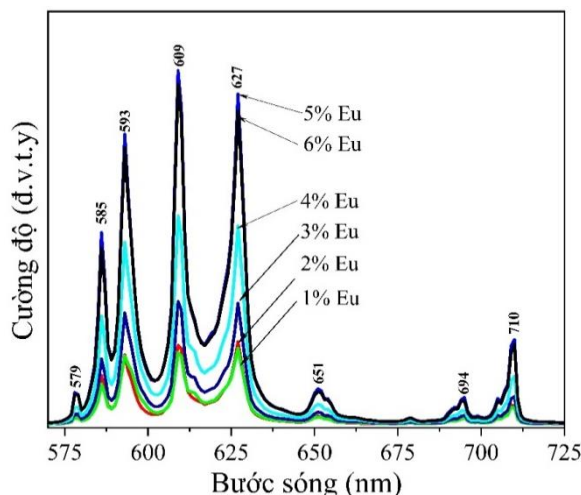
Trên cơ sở phổ PLE thu được, chúng tôi đã tiến hành đo phổ PL của mẫu vật liệu LSTO pha tạp 5% ion  $\text{Eu}^{3+}$  với các bước sóng kích thích khác nhau.

Hình 5 là kết quả nhận được của phổ PL với các bước sóng kích thích 288, 395, 465 và 536 nm của vật liệu LSTO:6%  $\text{Eu}^{3+}$ . Qua quan sát chúng tôi thấy rằng vật liệu phát xạ mạnh trong vùng ánh sáng cam-đỏ với các vị trí đỉnh phát xạ gần như không đổi khi thay đổi bước sóng kích thích. Các đỉnh phát xạ này là các đỉnh phát xạ đặc trưng của ion  $\text{Eu}^{3+}$  mà không phát hiện thấy bất kỳ đỉnh phát xạ lạ nào khác. Kết quả chỉ ra rằng vật liệu phát xạ với cường độ mạnh nhất khi kích thích ở bước sóng 395 nm. Đây là đỉnh kích thích đặc trưng của ion  $\text{Eu}^{3+}$  từ trạng thái cơ bản  $^7\text{F}_0$  lên trạng thái kích thích  $^5\text{L}_6$ . Điều đó cho thấy vật liệu huỳnh quang mà chúng tôi chế tạo được có tiềm năng ứng dụng cho WLED khi sử dụng chip nUV-LED 395 nm làm nguồn kích thích. Đồng thời chúng tôi quan sát thấy rằng, vị trí của các đỉnh phát xạ tuy thay đổi không đáng,

nhưng cường độ phát xạ phụ thuộc rất mạnh vào bước sóng kích thích. Cường độ phát xạ mạnh nhất thu được khi kích thích tại bước sóng 395 nm. Điều này cũng khá phù hợp với phổ PLE quan sát trên Hình 4. Do đó, chúng tôi chọn bước sóng kích thích 395 nm để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo.

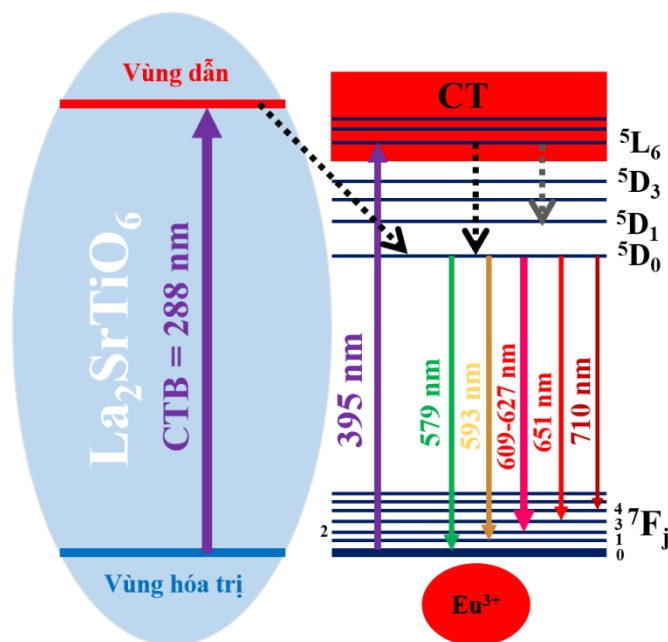


**Hình 5.** Phổ PL của mẫu LSTO:6%  $\text{Eu}^{3+}$  nung ở  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , với bước sóng kích thích 288 nm, 395 nm, 465 nm và 536 nm, đo ở nhiệt độ phòng



**Hình 6.** Phổ PL của các mẫu LSTO nung ở  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  với nồng độ pha tạp 1 ÷ 6%  $\text{Eu}^{3+}$ , đo ở nhiệt độ phòng với bước sóng kích thích 395 nm

### 3.4. Ảnh hưởng của nồng độ $\text{Eu}^{3+}$ lên tính chất quang của vật liệu



**Hình 7.** Sơ đồ mức năng lượng và quá trình truyền năng lượng và dịch chuyển mức năng lượng trong vật liệu LSTO pha tạp ion  $\text{Eu}^{3+}$

Trên cơ sở phân tích khả năng hấp thụ của họ vật liệu này, chúng tôi đã tiến hành đo phổ PL của các mẫu LSTO pha tạp ion  $\text{Eu}^{3+}$  ở các nồng độ pha tạp khác nhau, với bước sóng kích thích 395 nm, thu được kết quả trên Hình 6. Kết quả phân tích cho thấy vật liệu phát xạ mạnh trong vùng ánh sáng đỏ với các đỉnh đặc trưng của ion  $\text{Eu}^{3+}$ . Có thể thấy rằng hình dạng của các phổ là gần

như không thay đổi khi thay đổi nồng độ pha tạp của ion  $\text{Eu}^{3+}$ . Tuy nhiên, cường độ PL phụ thuộc rất mạnh vào nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  pha tạp. Đầu tiên, khi nồng độ ion  $\text{Eu}^{3+}$  tăng lên từ 1% đến 5%  $\text{Eu}^{3+}$  thì cường độ huỳnh quang của các đỉnh tăng lên và sau đó cường độ PL giảm xuống khi tiếp tục tăng nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  lên 6%. Điều này có thể giải thích như sau: khi tăng nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  từ 1% đến 5%, quá trình thay thế ion  $\text{Eu}^{3+}$  cho ion  $\text{La}^{3+}$  trong mạng nền tăng, dẫn đến làm tăng mật độ tâm phát quang  $\text{Eu}^{3+}$  tăng và tăng cường độ phát xạ trong mẫu. Khi nồng độ tiếp tục tăng lên 6%, khoảng cách giữa các ion  $\text{Eu}^{3+}$  -  $\text{Eu}^{3+}$  đạt được đến bán kính tới hạn ( $R_c$ ), dẫn đến quá trình truyền năng lượng ion  $\text{Eu}^{3+}$  này sang  $\text{Eu}^{3+}$  khác và kết quả là làm cho cường độ phát xạ của mẫu giảm xuống. Hiện tượng này gọi là hiện tượng dập tắt huỳnh quang do nồng độ. Để rõ ràng hơn với các quá trình hấp thụ và phát xạ của ion  $\text{Eu}^{3+}$  trong mạng nền LSTO, giản đồ các mức năng lượng chỉ ra các quá trình hấp thụ, phát xạ của vật liệu được trình bày trên Hình 7.

Trong nghiên cứu này, vật liệu LSTO pha tạp ion  $\text{Eu}^{3+}$  cho phát xạ tốt nhất khi mẫu nung tại nhiệt độ 1200 °C với nồng độ pha tạp 5%.

#### 4. Kết luận

Chúng tôi đã chế tạo thành công bột huỳnh quang LSTO pha tạp ion  $\text{Eu}^{3+}$  với nồng độ từ 1 – 6% bằng phương pháp phản ứng pha rắn ở nhiệt độ nung thiêu kết 1200 °C. Vật liệu thu được có kích thước hạt trung bình từ 3 – 4  $\mu\text{m}$ . Kết quả cho thấy vật liệu LSTO thu được hấp thụ mạnh vùng cận tử ngoại (NUV) xung quanh bước sóng 395 nm và phát xạ trong vùng ánh sáng cam đỏ (575-725 nm). Điều kiện thực nghiệm tối ưu để bột huỳnh quang LSTO: $\text{Eu}^{3+}$  cho phát xạ mạnh nhất khi ủ tại 1200 °C và pha tạp 5%  $\text{Eu}^{3+}$ . Kết quả cho thấy vật liệu LSTO: $\text{Eu}^{3+}$  chúng tôi chế tạo được phù hợp với ứng dụng chế tạo WLED trên cơ sở sử dụng chip NUV-LED làm nguồn kích thích.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. T. Tran *et al.*, “Excellent thermal stability and high quantum efficiency orange-red-emitting  $\text{AlPO}_4:\text{Eu}^{3+}$  phosphors for WLED application,” *J. Alloys Compd.*, vol. 853, 2021, Art. no. 156941, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156941.
- [2] V.Q. Nguyen *et al.*, “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.*, vol. 50, no. 36, pp. 12570-12582, 2021, doi: 10.1039/d1dt00115a.
- [3] Y. Zhang, L. Luo, G. Chen, Y. Liu, R. Liu, and X. Chen, “Green and red phosphor for LED backlight in wide color gamut LCD,” *J. Rare Earths*, vol. 38, no. 1, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.jre.2019.10.005.
- [4] K. Li and C. Shen, “White LED based on nano-YAG: $\text{Ce}^{3+}/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+},\text{Gd}^{3+}$  hybrid phosphors,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 123, no. 7, pp. 621-623, 2012, doi: 10.1016/j.ijleo.2011.06.005.
- [5] K. Li and C. Shen, “White light LED based on YAG: $\text{Ce}^{3+}$  and YAG: $\text{Ce}^{3+},\text{Gd}^{3+}$  phosphor,” *5th Int. Symp. Adv. Opt. Manuf. Test. Technol. Optoelectron. Mater. Devices Detect. Imager, Display, Energy Convers. Technol.*, 2010, doi: 10.1117/12.865938.
- [6] Y. Liu, M. Zhang, Y. Nie, J. Zhang, and J. Wang, “Growth of YAG: $\text{Ce}^{3+}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  eutectic ceramic by HDS method and its application for white LEDs,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 15, pp. 4931-4937, 2017, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.06.014.
- [7] A. Potdevin, G. Chadeyron, D. Boyer, and R. Mahiou, “Sol-gel based YAG: $\text{Ce}^{3+}$  powders for applications in LED devices,” *Phys. Status Solidi Curr. Top. Solid State Phys.*, vol. 4, no. 1, pp. 65-69, 2007, doi: 10.1002/pssc.200673550.
- [8] Y. Zhang, L. Li, X. Zhang, And Q. Xi, “Temperature effects on photoluminescence of YAG: $\text{Ce}^{3+}$  phosphor and performance in white light-emitting diodes,” *J. Rare Earths*, vol. 26, no. 3, pp. 446-449, 2008, doi: 10.1016/S1002-0721(08)60115-5.
- [9] Y. Takeda, H. Kato, M. Kobayashi, H. Kobayashi, and M. Kakihana, “Photoluminescence properties of  $\text{Mn}^{4+}$ -activated perovskite-type titanates,  $\text{La}_2\text{MTiO}_6:\text{Mn}^{4+}$  (M = Mg and Zn),” *Chemistry Letters*, vol. 44, no. 11, 2015, doi: 10.1246/cl.150748.
- [10] C. J. Howard, P. W. Barnes, B. J. Kennedy, and P. M. Woodward, “Structures of the ordered double perovskites  $\text{Sr}_2\text{YTaO}_6$  and  $\text{Sr}_2\text{YNbO}_6$ ,” *Acta Crystallogr. Sect. B Struct. Sci.*, vol. 61, no. 3, pp. 258-262, Jun. 2005, doi: 10.1107/S0108768105012395.

- [11] L. Xi, Y. Pan, X. Chen, S. Huang, and M. Wu, "Optimized photoluminescence of red phosphor  $\text{Na}_2\text{SnF}_6:\text{Mn}^{4+}$  as red phosphor in the application in 'warm' white LEDs," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 100, no. 5, 2017, doi: 10.1111/jace.14708.
- [12] Q. Sun *et al.*, "Double perovskite  $\text{Ca}_2\text{LuTaO}_6:\text{Eu}^{3+}$  red-emitting phosphors: Synthesis, structure and photoluminescence characteristics," *J. Alloys Compd.*, vol. 804, pp. 230-236, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.06.260.
- [13] A. Fu *et al.*, "A novel double perovskite  $\text{La}_2\text{ZnTiO}_6:\text{Eu}^{3+}$  red phosphor for solid-state lighting: Synthesis and optimum luminescence," *Opt. Laser Technol.*, vol. 96, pp. 43-49, 2017, doi: 10.1016/j.optlastec.2017.04.025.
- [14] B. Bondzior, D. Stefańska, T. H. Q. VU, N. Miniajluk-Gaweł, and P. J. Dereń, "Red luminescence with controlled rise time in  $\text{La}_2\text{MgTiO}_6:\text{Eu}^{3+}$ ," *J. Alloys Compd.*, vol. 852, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157074.
- [15] B. Su, H. Xie, Y. Tan, Y. Zhao, Q. Yang, and S. Zhang, "Luminescent properties, energy transfer, and thermal stability of double perovskites  $\text{La}_2\text{MgTiO}_6:\text{Sm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ ," *J. Lumin.*, vol. 204, pp. 457-463, 2018, doi: 10.1016/j.jlumin.2018.08.013.
- [16] H. Yuan, Z. Huang, L. Xu, H. Jia, X. Sun, and K. Liu, " $\text{La}_2\text{MgTiO}_6:\text{Bi}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  photoluminescence materials: Molten salt preparation,  $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$  energy transfer and thermostability," *J. Lumin.*, vol. 224, April 2020, Art. no. 117290, doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117290.
- [17] Z. Yang *et al.*, "Studies on luminescence properties of double perovskite deep red phosphor  $\text{La}_2\text{ZnTiO}_6:\text{Mn}^{4+}$  for indoor plant growth LED applications," *J. Alloys Compd.*, vol. 802, pp. 628-635, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.06.199.
- [18] Y. W. Seo, D. Kim, W. Ran, S. H. Park, B. C. Choi, and J. H. Jeong, "Luminescence properties and energy transfer of  $\text{Mn}^{4+}$ -doped double perovskite  $\text{La}_2\text{ZnTiO}_6$  phosphor," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 106, May 2020, Art. no. 109980, doi: 10.1016/j.optmat.2020.109980.
- [19] M. Hu, C. Liao, L. Xia, W. You, and Z. Li, "Low temperature synthesis and photoluminescence properties of  $\text{Mn}^{4+}$ -doped  $\text{La}_2\text{MgTiO}_6$  deep-red phosphor with a LiCl flux," *J. Lumin.*, vol. 211, pp. 114-120, March 2019, doi: 10.1016/j.jlumin.2019.03.034.
- [20] J. Ou, X. Yang, and S. Xiao, "Luminescence performance of  $\text{Cr}^{3+}$  doped and  $\text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{4+}$  co-doped  $\text{La}_2\text{ZnTiO}_6$  phosphors," *Mater. Res. Bull.*, vol. 124, 2020, Art. no. 110764, doi: 10.1016/j.materresbull.2019.110764.
- [21] K. Li, H. Lian, R. Van Deun, and M. G. Brik, "A far-red-emitting  $\text{NaMgLaTeO}_6:\text{Mn}^{4+}$  phosphor with perovskite structure for indoor plant growth," *Dye. Pigment.*, vol. 162, pp. 214-221, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.dyepig.2018.09.084.
- [22] C. Wei, D. Xu, J. Li, A. Geng, X. Li, and J. Sun, "Synthesis and luminescence properties of  $\text{Eu}^{3+}$  doped a novel double perovskite  $\text{Sr}_2\text{YTaO}_6$  phosphor," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 2864-2871, Feb. 2019, doi: 10.1007/s10854-018-0563-2.
- [23] J. Huang *et al.*, " $\text{La}_2\text{MgTiO}_6:\text{Eu}^{2+}/\text{TiO}_2$ -based composite for methyl orange (MO) decomposition," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 125, no. 12, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-3147-y.
- [24] K. Singh, M. I. U. Haq, and S. Mohan, "Synergism of h-BN and  $\text{La}_2\text{O}_3$  in improving the tribological performance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, 2024, doi: 10.1177/13506501241272777.
- [25] W. Ismail, A. Belal, W. Abdo, and A. El-Shaer, "Investigating the physical and electrical properties of  $\text{La}_2\text{O}_3$  via annealing of  $\text{La}(\text{OH})_3$ ," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1-12, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-57848-8.
- [26] S. Bakshi, S. Rani, and P. Kaur, "Down conversions luminescent properties of Eu doped  $\text{SrTiO}_3$ ," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2267, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2267/1/012042.
- [27] M. Qin *et al.*, "Response to comment on 'point defect structure of La-doped  $\text{SrTiO}_3$  ceramics with colossal permittivity,'" *Scr. Mater.*, vol. 190, pp. 118-120, 2021, doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.08.037.
- [28] A. Rocca, A. Licciulli, M. Politi, and D. Diso, "Rare Earth-Doped  $\text{SrTiO}_3$  Perovskite Formation from Xerogels," *ISRN Ceram.*, vol. 2012, pp. 1-6, 2012, doi: 10.5402/2012/926537.
- [29] X. Yin, J. Yao, Y. Wang, C. Zhao, and F. Huang, "Novel red phosphor of double perovskite compound  $\text{La}_2\text{MgTiO}_6:\text{xEu}^{3+}$ ," *J. Lumin.*, vol. 132, no. 7, pp. 1701-1704, 2012, doi: 10.1016/j.jlumin.2012.02.006.