

## Chế tạo và đặc trưng quang phổ của vật liệu strontium magnesium silicate pha tạp với các nồng độ $\text{Eu}^{3+}$ khác nhau

### Synthesis and spectroscopic characterization of strontium magnesium silicate phosphors doped with various $\text{Eu}^{3+}$ concentrations

Bùi Kiều My<sup>a,b\*</sup>, Hồ Văn Tuyền<sup>a,b</sup>  
Bui Kieu My<sup>a,b\*</sup>, Ho Van Tuyen<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>a</sup>Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

<sup>b</sup>Khoa Môi trường và Khoa học Tự nhiên, Trường Công Nghệ, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>b</sup>Faculty of Environment and Natural Sciences, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 03/04/2024, ngày phản biện xong: 03/05/2024, ngày chấp nhận đăng: 22/05/2024)

#### Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, vật liệu strontium magnesium silicate pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  với các nồng độ khác nhau đã được chế tạo bằng phương pháp phản ứng pha rắn. Cấu trúc tinh thể và hình thái bề mặt mẫu chế tạo được khảo sát bằng phép phân tích nhiễu xạ tia X và ảnh hiển vi điện tử quét SEM. Vật liệu thu được được xác định là hoàn toàn đơn pha  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  và có cấu trúc pha tetragonal. Các mẫu  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  nồng độ cao sẽ làm tăng tỉ số cường độ  $R$  và tính bất đối tại vị trí  $\text{Eu}^{3+}$ . Với kết quả phổ phát quang và tọa độ màu, có thể thấy các mẫu  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  với nồng độ pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  4.0-5.0 mol% sẽ cho cường độ phát quang tốt với màu bức xạ dịch về vùng đỏ đậm.

*Từ khóa:* Vật liệu strontium magnesium silicate; lý thuyết Judd-Ofelt; Europium; phát quang.

#### Abstract

In this work, strontium magnesium silicate phosphors with various  $\text{Eu}^{3+}$  concentrations have been fabricated by solid state reaction method. Structure and surface morphology of the fabricated samples were investigated by X-ray diffractometer and SEM images. The material was determined to be completely single-phase  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  and has a tetragonal phase structure.  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  samples doped with high concentrations of  $\text{Eu}^{3+}$  will increase the intensity ratio  $R$  and chirality at the  $\text{Eu}^{3+}$  site. With the luminescence spectrum results and color coordinates, it can be seen that  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  samples with  $\text{Eu}^{3+}$  doping concentration of 4.0-5.0 mol% will give good luminescence intensity with the radiation color shifting to the dark red region.

*Keywords:* Strontium magnesium silicate phosphors; Judd-Ofelt theory; Europium; luminescence.

\*Tác giả liên hệ: Bùi Kiều My

Email: buitkiemyl@duytan.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Vật liệu phát quang strontium magnesium silicate pha tạp các ion đất hiếm thu hút sự quan tâm nghiên cứu do chúng được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như vật liệu chiếu sáng, vật liệu lân quang, vật liệu quang xúc tác [1-4]. Kể từ khi được nghiên cứu về mặt cấu trúc năm 1983, đến nay rất nhiều công bố về vật liệu này tập trung vào tính chất lân quang trên cặp ion  $\text{Eu}^{2+}/\text{Dy}^{3+}$ , các nghiên cứu về hướng này vẫn tiếp tục cho đến những năm gần đây [5]. Ngoài ra một số nguyên tố đất hiếm khác như  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$  cũng được pha tạp vào nền strontium magnesium silicate nhằm nghiên cứu tính chất quang, tính chất nhiệt phát quang và quá trình truyền năng lượng nhằm tăng cường phát xạ [6-9]v.v. Tuy nhiên, nghiên cứu về  $\text{Eu}^{3+}$  pha tạp trong mạng nền này vẫn rất hạn chế, hiện nay chỉ có hai nghiên cứu thực hiện theo hướng này [2, 10]. Các nghiên cứu này tập trung vào phương pháp chế tạo và tính chất phát quang của vật liệu mà chưa đánh giá tính chất môi trường tại vị trí pha tạp hay các thông số phát xạ thông qua lý thuyết Judd-Ofelt. Trong số các ion đất hiếm có bức xạ ở vùng đỏ và hồng ngoại như là  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  thì ion  $\text{Eu}^{3+}$  phát ra bức xạ đỏ mạnh trong vùng cam đến hồng ngoại gần. Phát xạ của ion  $\text{Eu}^{3+}$  là kết quả của sự chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_j$  ( $J = 0, 1, 2, \dots, 6$ ) có đặc điểm độ đơn sắc cao với các đỉnh bức xạ vạch hẹp. Do đó, việc pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  trong các nền vật liệu khác nhau có thể được ứng dụng trong bộ chuyển đổi tần số ánh sáng, laser và chiếu sáng [11-14]. Ngoài ra, phát xạ của ion  $\text{Eu}^{3+}$  có thể ứng dụng làm vật liệu phát quang hiệu quả cho các nguồn sáng trạng thái rắn, và bản thân  $\text{Eu}^{3+}$  còn đóng vai trò như một đầu dò để đoán nhận môi trường xung quanh vị trí ion tạp thông qua thông tin từ phổ phát quang và tỉ số cường độ  $R$  (tỉ số bức xạ  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2 / {}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ ) [13]. Đối với phổ phát xạ  $\text{Eu}^{3+}$ , tỉ số cường độ giữa chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  (chuyển dời lưỡng cực điện) sang chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  (lưỡng cực từ) có thể cho thấy tính đối xứng cục

bộ tại vị trí  $\text{Eu}^{3+}$  trong mạng tinh thể và một số thông số phát xạ như thời gian sống tính toán ( $\tau_{cal}$ ), xác suất chuyển dời ( $A$ ), tỉ số phân nhánh ( $\beta_R$ ) có thể được tiên đoán từ lý thuyết Judd-Ofelt áp dụng cho phổ phát quang của ion  $\text{Eu}^{3+}$ , và chúng được sử dụng để đánh giá tính đơn sắc của quá trình phát xạ của  $\text{Eu}^{3+}$  [13, 15, 16]. Do đó, trong nghiên cứu này, vật liệu strontium magnesium silicate pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  với các nồng độ khác nhau đã được chế tạo và khảo sát các đặc trưng quang phổ. Các thông số cấu trúc và hình thái học được đánh giá thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X, các tính chất quang của vật liệu được khảo sát bằng phổ phát quang, kích thích phát quang và thông số cường độ từ lý thuyết Judd-Ofelt.

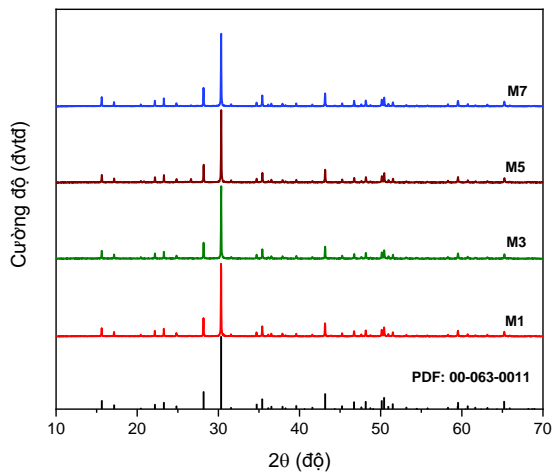
## 2. Thục nghiệm

Vật liệu strontium magnesium silicate với công thức hóa học  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  với các nồng độ khác nhau 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mol% lần lượt được kí hiệu M1, M2,..., M7 đã được tổng hợp bằng phương pháp phản ứng pha rắn. Các tiền chất ban đầu gồm có  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  và  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ . Các hóa chất được cân với tỉ lệ hợp phần và được trộn, nghiền trong thời gian 30 phút ở nhiệt độ phòng. Hỗn hợp sau đó được sấy ở nhiệt độ  $50^\circ\text{C}$  trong 24 giờ, sau đó cho vào lò nung  $1200^\circ\text{C}$  trong 5 giờ với tốc độ gia nhiệt  $60^\circ\text{C}/\text{phút}$ . Lò được làm nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng, mẫu thu được được đem nghiền mịn bằng cối mã não trước khi thực hiện các phép phân tích cấu trúc cũng như tính chất quang.

Cấu trúc tinh thể của vật liệu được khảo sát bằng phép phân tích nhiễu xạ tia X trên thiết bị đo D8-Advance diffractometer (Bruker, Germany) và hình thái bề mặt mẫu được đánh giá bằng ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) sử dụng thiết bị Jeol 6490 equipment (JED 2300; Japan). Phổ phát quang, kích thích phát quang được đo đạt trên máy quang phổ FL3-22 spectrophotometer (Horiba Jobin-Yvon) với nguồn đèn Xenon-450W.

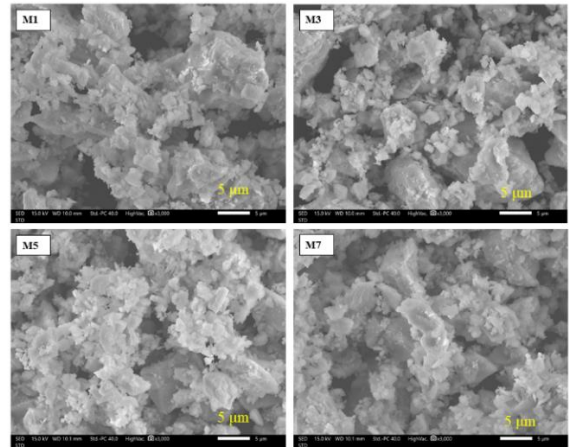
### 3. Kết quả và thảo luận

Cấu trúc tinh thể của vật liệu  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  được khảo sát bằng nhiễu xạ tia X (XRD) cho các mẫu M1, M3, M5 và M7. Kết quả vật liệu sau khi chế tạo có các đỉnh nhiễu xạ hoàn toàn phù hợp với thẻ chuẩn PDF: 00-063-



Hình 1. Giảm nhiễu xạ tia X các mẫu M1, M3, M5 và M7.

0011 cho thấy vật liệu đơn pha  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ , có cấu trúc tetragonal. Bên cạnh đó, việc không quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ của các pha khác cho thấy rằng điều kiện công nghệ chế tạo đã sử dụng là phù hợp và hàm lượng pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  đến 5 mol% không làm ảnh hưởng đến cấu trúc của vật liệu.



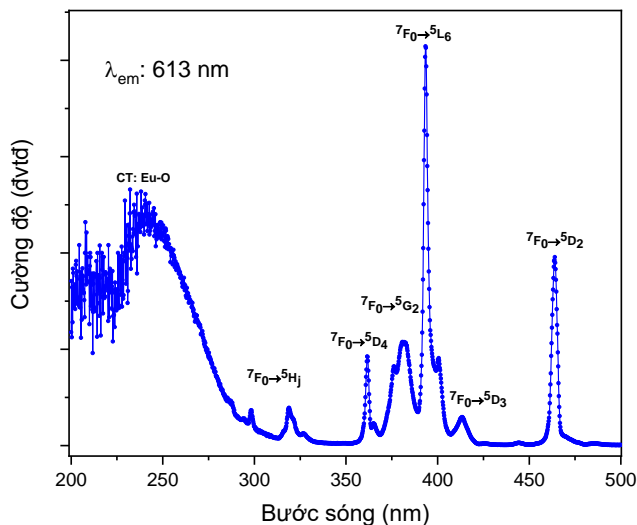
Hình 2. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của các mẫu M1, M3, M5 và M7.

Ảnh hiển vi điện tử quét SEM của các mẫu M1, M3, M5 và M7 được trình bày trên Hình 2, kết quả cho thấy các hạt không đồng đều và kết đám kích thước lớn. Ảnh SEM của các mẫu tương tự nhau và kết hợp với kết quả XRD cho thấy điều kiện chế tạo là ổn định trong việc tạo pha vật liệu.

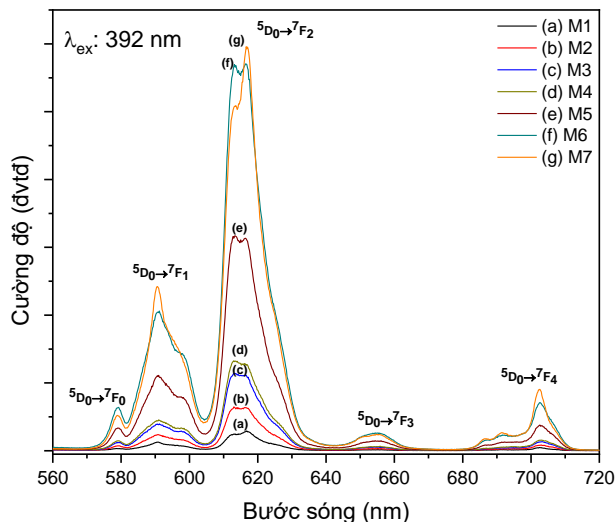
Trên Hình 3 là phổ kích thích phát quang (photoluminescence excitation-PLE) của mẫu M7 thu tại bước sóng phát xạ 613 nm. Phổ PLE bao gồm một đám rộng ở 245 nm bắt nguồn từ chuyển dời truyền điện tích giữa  $\text{Eu}^{3+}$  và  $\text{O}^{2-}$  [2], và các đỉnh kích thích vạch hẹp đặc trưng cho chuyển dời điện tử trong cấu hình  $4f^n$  của ion  $\text{Eu}^{3+}$  trong mạng nền strontium magnesium silicate [2]. Các đỉnh kích thích mạnh bao gồm 362 ( ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_4$ ), 381 ( ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{G}_2$ ), 392 ( ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$ ), 414 ( ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_3$ ), and 464 nm ( ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_2$ ) và một số đỉnh cường độ bé vùng 300 nm ứng với chuyển dời  ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{H}_j$ . Trong đó vạch kích thích

tại bước sóng 392 nm tương ứng với chuyển dời  ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$  có cường độ tốt nhất, và bức xạ này được lựa chọn để kích thích  $\text{Eu}^{3+}$  trong phép đo phân tích phổ phát quang.

Phổ phát quang (photoluminescence-PL) của vật liệu  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  với các nồng độ khác nhau dưới kích thích bằng bức xạ 392 nm được trình bày ở Hình 4. Phổ PL của các mẫu có dạng tương tự nhau chỉ khác nhau về cường độ với các đỉnh bức xạ là các vạch hẹp đặc trưng cho chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_J$  ( $J = 0, 1, \dots, 4$ ) của ion  $\text{Eu}^{3+}$ . Trong đó các đỉnh phát xạ mạnh tại 591 và 616 nm tương ứng cho chuyển dời lưỡng cực từ  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  và lưỡng cực điện  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  tương ứng, và đây là hai dải phát xạ đóng góp chính vào bức xạ chung của vật liệu bởi chúng có cường độ lớn hơn hẳn những bức xạ còn lại. Một số dải bức xạ yếu hơn gồm có  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0$  tại 579 nm,  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$  tại 655 nm, và  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$  tại 705 nm.



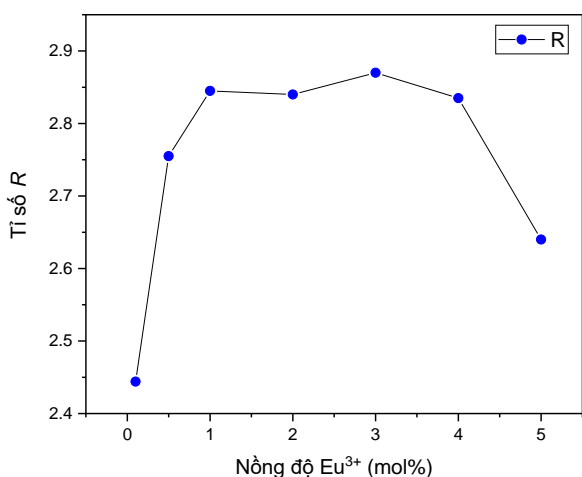
Hình 3. Phổ kích thích phát quang của mẫu M7 thu tại bước sóng phát xạ 613 nm.



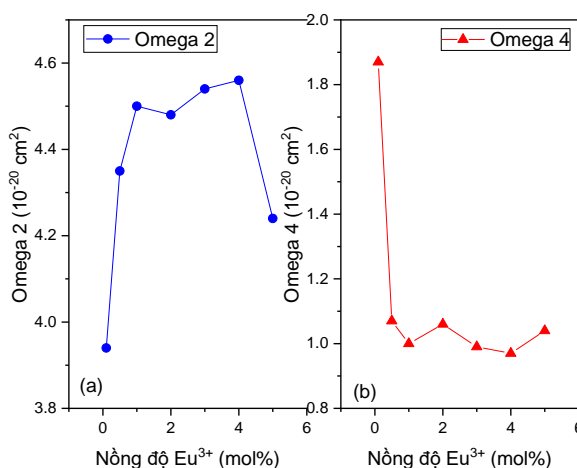
Hình 4. Phổ phát quang các mẫu thay đổi theo nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  dưới kích thích 392 nm.

Như đã biết, trong số các chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_j$  của  $\text{Eu}^{3+}$  ions, bức xạ có cường độ mạnh nhất tại 616 nm thuộc về chuyển dời lưỡng cực điện cho phép  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  và nó rất nhạy với sự thay đổi của môi trường xung quanh vị trí  $\text{Eu}^{3+}$ . Bức xạ có cường độ mạnh thứ hai tại bước sóng 591 nm thuộc về chuyển dời lưỡng cực từ  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  và chuyển dời này hầu như là độc lập với sự thay đổi của môi trường xung quanh vị trí  $\text{Eu}^{3+}$ . Do đó, tỉ số cường độ ( $R$ ) giữa chuyển dời  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  với  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  thường được sử dụng để đánh giá

sự thay đổi môi trường/tính bất đối xứng tại vị trí  $\text{Eu}^{3+}$  [15, 17]. Kết quả tính toán tỉ số  $R$  cho tất cả các mẫu được trình bày trên Hình 5, với giá trị nằm trong khoảng 2.44 – 2.87 tương ứng mẫu M1 và M5. Tuy nhiên ta cũng thấy sự thay đổi tỉ số  $R$  giữa các mẫu từ M2 đến M6 không lớn, nằm trong khoảng giá trị từ 2.75 đến 2.87, điều này cho thấy các nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  ứng với các mẫu này sẽ cho phát xạ màu đỏ tốt hơn những mẫu khác khi mà cường độ dải bức xạ đỏ ở 616 nm sẽ chiếm ưu thế hơn.



Hình 5. Kết quả tỉ số cường độ  $R$  ứng với các mẫu có nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  khác nhau.



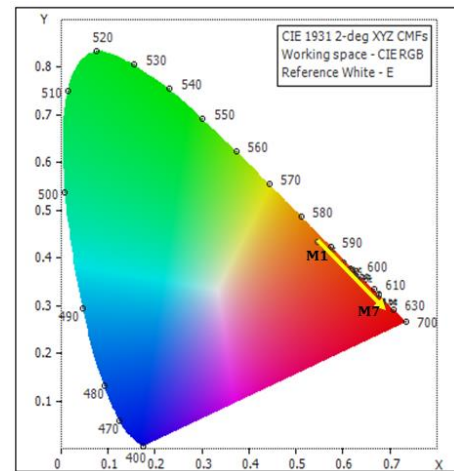
Hình 6. Kết quả thông số Omega 2 và Omega 4 ứng với các mẫu có nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  khác nhau.

Bên cạnh phân tích tỉ số cường độ  $R$ , các đặc trưng phát quang của ion  $\text{Eu}^{3+}$  trong vật liệu  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  cũng được đoán nhận thông qua các thông số cường độ  $\Omega_{\lambda=2,4,6}$  được tính từ lý thuyết Judd-Ofelt áp dụng cho phổ phát quang của  $\text{Eu}^{3+}$  trên Hình 4. Thông thường, các thông số cường độ được tính thông qua phổ hấp thụ, phổ phát quang [17-20] hoặc phổ kích thích [21, 22].

$$\frac{\int I(^5D_0 \rightarrow ^7F_{2,4,6})d\nu}{\int I(^5D_0 \rightarrow ^7F_1)d\nu} \approx \frac{A_{ed}(^5D_0 \rightarrow ^7F_{2,4,6})}{A_{md}(^5D_0 \rightarrow ^7F_1)} = \left[ \frac{e^2}{S_{md}} \right] \left[ \frac{\nu_J}{\nu_1} \right]^3 \left[ \frac{n(n^2+2)^2}{9} \right] \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} \|U^{(\lambda)}\|^2 \quad (1)$$

Ở đây  $A_{md}$  và  $A_{ed}$  tương ứng là xác suất chuyển dời phát xạ của  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  và  $^5D_0 \rightarrow ^7F_{2,4,6}$ ;  $\nu$  và  $n$  là năng lượng phát xạ và chiết xuất của vật liệu;  $S_{md}$  là lực vạch của chuyển dời  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ , nó độc lập và có thể tìm thấy ở công bố [26];  $\|U^{(\lambda)}\|^2$  ( $\lambda = 2, 4, 6$ ) là các phần tử ma trận rút gọn tương ứng với các chuyển dời  $^5D_0 \rightarrow ^7F_{2,4,6}$  và chúng nhận các giá trị tương ứng là 0.0032, 0.0023 và 0.0003 [18]. Với kết quả phổ phát quang ở Hình 4, giá trị  $\Omega_2$  và  $\Omega_4$  của các mẫu được tính toán và trình bày trên Hình 5. Do giới hạn của phép đo không thu được bức xạ tương ứng chuyển dời  $^5D_0 \rightarrow ^7F_6$ , nên giá trị  $\Omega_6$  không được tính toán trong nghiên cứu này. Lý thuyết Judd-Ofelt đã chỉ ra rằng, giá trị  $\Omega_2$  càng lớn thì tính covalence và tính bất đối xứng càng lớn [17, 27]. Trong khi đó,  $\Omega_4$  &  $\Omega_6$  liên quan đến độ cứng và các đặc trưng khối của vật liệu [17]. Kết quả  $\Omega_2$  đối với các mẫu thay đổi từ 3.9 đến  $4.6 (\times 10^{20} \text{ cm}^2)$ , trong khi  $\Omega_4$  thay đổi từ 0.97 đến 1.97 như được trình bày trên Hình 6 (a) và Hình 6 (b) tương ứng. Kết quả ở Hình 6 cho thấy so với mẫu có nồng độ thấp 0.1 mol% (mẫu M1) thì khi nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  lớn, sự bất đối xứng tại vị trí thay thế  $\text{Eu}^{3+}$  cũng tăng lên, điều này thể hiện qua giá trị  $\Omega_2$  của các mẫu còn lại so với mẫu M1. Tuy nhiên giữa các mẫu M2 đến M6 thì sự thay đổi không nhiều. Tương tự, giá trị  $\Omega_4$  có sự thay đổi lớn giữa mẫu nồng độ thấp M1 so với các mẫu nồng độ cao. Ngoài ra, sự thay đổi giá

trị  $\Omega_2$  của các mẫu là phù hợp với sự thay đổi của tỉ số cường độ  $R$ .



Hình 7. Tọa độ màu CIE của các mẫu có nồng độ  $\text{Eu}^{3+}$  khác nhau.

Tọa độ màu CIE (CIE chromaticity coordinates) cũng được tính toán cho các bức xạ của các mẫu có nồng độ pha tạp  $\text{Eu}^{3+}$  thay đổi để đánh giá màu sắc phát xạ của vật liệu. Kết quả tọa độ CIE ( $x, y$ ) của các mẫu được thể hiện trên Bảng 1 và Hình 7. Kết quả chỉ ra tọa độ màu của các mẫu thay đổi lớn khi mà nồng độ pha tạp thay đổi và nồng độ càng cao thì kết quả phát xạ đỏ càng đậm, tọa độ dịch về vùng đỏ đậm như có thể thấy trên Hình 7. Từ các tọa độ CIE này, nhiệt độ màu tương đối CCT (correlated color temperature) cũng được tính toán thông qua biểu thức [28, 29].

$$\text{CCT} = -449n^3 + 3525n^2 - 6823n + 5520.33 \quad (2)$$

Ở đây  $n = (x-x_e)/(y-y_e)$  với ( $x_e = 0.332$ ,  $y_e = 0.186$ ) và kết quả CCT của các mẫu được liệt kê ở Bảng 1. Nó cho thấy vật liệu phát xạ ánh sáng “âm-warm” trong vùng cảm nhận của con

người. Với kết quả phổ phát quang và tọa độ màu, có thể thấy các mẫu M6, M7 sẽ cho cường độ phát quang tốt với màu bức xạ dịch về vùng đỏ đậm.

Bảng 1. Tọa độ màu CIE ( $x$ ,  $y$ ) và nhiệt độ màu tương đối CCT của các mẫu đã chế tạo.

Mẫu	CIE ( $x$ , $y$ )		CCT (K)
M1	0.545	0.433	1967
M2	0.600	0.389	1623
M3	0.619	0.374	1722
M4	0.614	0.378	1682
M5	0.623	0.370	1769
M6	0.675	0.324	3426
M7	0.677	0.322	3535

#### 4. Kết luận

Vật liệu strontium magnesium silicate  $Sr_2MgSi_2O_7$  pha tạp  $Eu^{3+}$  với các nồng độ khác nhau đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp phản ứng pha rắn ở  $1200^\circ C$ . Vật liệu thu được hoàn toàn đơn pha  $Sr_2MgSi_2O_7$  và có cấu trúc pha tetragonal. Tỷ số cường độ R và thông số  $\Omega_2$  cho thấy các mẫu  $Sr_2MgSi_2O_7$  pha tạp  $Eu^{3+}$  nồng độ cao sẽ làm tăng tỉ số cường độ R và tính bất đối tại vị trí  $Eu^{3+}$ . Từ kết quả phổ phát quang và tọa độ màu, có thể thấy các mẫu M6, M7 sẽ cho cường độ phát quang tốt với màu bức xạ dịch về vùng đỏ đậm.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] X. Zhang, X. Tang, J. Zhang, H. Wang, J. Shi, M. Gong. (2010). "Luminescent properties of  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}$  as blue phosphor for NUV light-emitting diodes". *Powder Technology* (204), 263-267.
- [2] H. Wu, Y. Hu, Y. Wang, F. Kang, Z. Mou. (2011). "Investigation on  $Eu^{3+}$  doped  $Sr_2MgSi_2O_7$  red-emitting phosphors for white-light-emitting diodes" *Optics & Laser Technology* (43), 1104-1110.
- [3] H. Wu, Y. Hu, X. Wang. (2011). "Investigation of the trap state of  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  phosphor and decay process". *Radiation Measurements* (46), 591-594.
- [4] J. Tang, X. Liu, Y. Liu, X. Zhang, Y. Lin, L. Chen, D. Fang, J. Wang. (2022). "Novel Z-scheme  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}, Dy^{3+}/Ag_3PO_4$  photocatalyst for round-the-clock efficient degradation of organic pollutants and hydrogen production". *Chemical Engineering Journal* (435), 134773.
- [5] O. Hai, B. Qin, X.N. Xiao, Q. Ren, X.L. Wu, M.K. Pei, J. Li. (2024). "The long rod-shaped  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  with ultrahigh afterglow performance". *Luminescence* (39), e4695.
- [6] A. Antuzevics, G. Doke, G. Kriek, P. Rodionovs, D. Nilova, J. Cirulis, A. Fedotovs, U. Rogulis. (2023). "Shortwave Ultraviolet Persistent Luminescence of  $Sr_2MgSi_2O_7:Pr^{3+}$ ". *Materials* (16), 1776.
- [7] S. Thomas, J.M. Kalita, M.L. Chithambo, O.M. Ntwaeaborwa. (2019). "The influence of dopants on thermoluminescence of  $Sr_2MgSi_2O_7$ ". *Journal of Luminescence* (208) 104-107.
- [8] B. Yuan, Y. Song, L. Kong, C. Dai, H. Zou. (2018). "The sensitized luminescence and tunable color of single-component  $Sr_2MgSi_2O_7:Bi^{3+}/Sm^{3+}/Tb^{3+}$  phosphor via energy transfer for white-light emitting diodes". *Physica B: Condensed Matter* (550), 75-89.
- [9] K.H. Kwon, W.B. Im, D.Y. Jeon. (2013). "Energy transfer in  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}$  phosphors in nano scale and their application to solid state lighting with excellent color rendering". *J Nanosci Nanotechnol* (13), 4079-4083.
- [10] Y. Zhai, Z. You, Y. Liu, Y. Sun, Q. Ji. (2012). "Properties of red-emitting phosphors  $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{3+}$  prepared by gel-combustion method assisted by microwave". *Journal of Rare Earths* (30). 114-117.
- [11] K. Binnemans. (2015). "Interpretation of europium(III) spectra". *Coordination Chemistry Reviews* (295) 1-45.
- [12] M. Zagari, R.-C. Suci, S. Rada, M.E. Pică, S. Pruneanu. (2021). "Structural and optical properties of  $Eu^{3+}$  ions in lead glass for photonic applications". *Journal of Non-Crystalline Solids* (569), 120988.
- [13] X. Zhu, K. Yang, A. Wu, H. Bai, J. Bao, Y. Qiao, Y. Yang, W. Li, Y. Liu. (2019). "Luminescence Studies and Judd-Ofelt Analysis on  $SiO(2)@LaPO(4):Eu@SiO(2)$  Submicro-spheres with Different Size of Intermediate Shells". *Sci Rep* (9), 13065.

- [14] E. Cantelar, J.A. Sanz-García, A. Sanz-Martín, J.E. Muñoz Santiuste, F. Cussó. (2020). "Structural, photoluminescent properties and Judd-Ofelt analysis of  $\text{Eu}^{3+}$ -activated  $\text{CaF}_2$  nanocubes" *Journal of Alloys and Compounds* (813), 152194.
- [15] P. Manasa, C.K. Jayasankar. (2016). "Luminescence and phonon side band analysis of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped lead fluorosilicate glasses" *Opt. Mater.* (62), 139–145.
- [16] N.T.Q. Lien, H.V. Tuyen, B. Sengthong, N.N. Trac, N.H. Vi, L.X. Hung, D.T. Khan, T.T. Hong. (2022). "Combustion synthesis of  $\text{Ba}_2\text{Ca}(\text{BO}_3)_2:\text{Eu}^{2+}$  phosphors and position of 4f and 5d energy levels of lanthanides in  $\text{Ba}_2\text{Ca}(\text{BO}_3)_2$  host lattice". *Optical Materials* (134), 113075.
- [17] S. Arunkumar, K. Venkata Krishnaiah, K. Marimuthu. (2013). "Structural and luminescence behavior of lead fluoroborate glasses containing  $\text{Eu}^{3+}$  ions". *Physica B: Condensed Matter* (416), 88-100.
- [18] P. Babu, C.K. Jayasankar. (2000). "Optical spectroscopy of  $\text{Eu}^{3+}$  ions in lithium borate and lithium fluoroborate glasses". *Physica B: Condensed Matter* (279), 262-281.
- [19] E.M. Bouabdalli, M.E. Jouad, N. Gaumer, S. Touhtouh, A. Hajjaji. (2023). "Structural, optical behavior and Judd-Ofelt analysis of europium-doped silicophosphate glasses for red-emitting device applications". *Journal of Luminescence* (256), 119640.
- [20] M.H.V. Werts, R.T.F. Jukes, J.W. Verhoeven. (2002). "The emission spectrum and the radiative lifetime of  $\text{Eu}^{3+}$  in luminescent lanthanide complexes". *Physical Chemistry Chemical Physics* (4), 1542-1548.
- [21] A. Ciric, L. Marciniak, M.D. Dramicanin. (2022). "Self-referenced method for the Judd-Ofelt parametrisation of the  $\text{Eu}^{3+}$  excitation spectrum". *Scientific Reports* (12), 563.
- [22] W. Luo, J. Liao, R. Li, X. Chen. (2010). "Determination of Judd-Ofelt intensity parameters from the excitation spectra for rare-earth doped luminescent materials". *Phys Chem Chem Phys* (12), 3276-3282.
- [23] P. Manasa, C.K. Jayasankar. (2016). "Luminescence and phonon side band analysis of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped lead fluorosilicate glasses". *Optical Materials* (62), 139-145.
- [24] N.T.Q. Lien, N.N. Trac, P.V. Do, H.V. Tuyen. (2022). "Judd-Ofelt analysis of  $\text{Eu}^{3+}$  and adjustable emission in  $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  co-doped sodium aluminosilicate glasses". *Journal of Physics and Chemistry of Solids* (164), 110637.
- [25] D. Van Phan, V.X. Quang, H. Van Tuyen, T. Ngoc, V.P. Tuyen, L.D. Thanh, N.X. Ca, N.T. Hien. (2019). "Structure, optical properties and energy transfer in potassium-alumino-borotellurite glasses doped with  $\text{Eu}^{3+}$  ions". *Journal of Luminescence* (216), 116748.
- [26] X. Joseph, R. George, S. Thomas, M. Gopinath, M.S. Sajna, N.V. Unnikrishnan. (2014). "Spectroscopic investigations on  $\text{Eu}^{3+}$  ions in Li-K-Zn fluorotellurite glasses". *Optical Materials* (37), 552-560.
- [27] K. Selvaraju, K. Marimuthu, T.K. Seshagiri, S.V. Godbole. (2011). "Thermal, structural and spectroscopic investigations on  $\text{Eu}^{3+}$  doped borotellurite glasses". *Materials Chemistry and Physics* (131), 204-210.
- [28] G. Lakshminarayana, S.O. Baki, A. Lira, U. Caldiño, A.N. Meza-Rocha, I.V. Kityk, A.F. Abas, M.T. Alresheedi, M.A. Mahdi. (2018). "Effect of alkali/mixed alkali metal ions on the thermal and spectral characteristics of  $\text{Dy}^{3+}:\text{B}_2\text{O}_3\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  glasses". *Journal of Non-Crystalline Solids* (481), 191-201.
- [29] C.S. McCamy. (1992). "Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates". *Color Research and Application* (17), 142-144.