



Nghiên cứu tính chất quang của vật liệu nano $Gd_2O_3:Eu$ bằng thuyết Judd-Ofelt Studying optical properties of $Gd_2O_3:Eu$ nanophosphor by Judd-Ofelt theory

Ngô Khắc Không Minh^{1,2*}, Ngô Quốc Luân³, Phan Thanh Phường³, Phạm Thanh Tùng³, Lâm Thị Kiều Giang⁴, Nguyễn Vũ^{1,4}

¹Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Đại học Nam Cần Thơ

³Đại học Cần Thơ

⁴Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

*Email: nkkminh1512@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: 20/07/2022

Accepted: 20/09/2022

Published: 25/09/2022

Keywords:

$Gd_2O_3:Eu^{3+}$, combustion synthesis, nanomaterials, luminescence, Judd Ofelt theory

ABSTRACT

Eu^{3+} -doped Gd_2O_3 nanophosphor were successfully obtained by a straightforward combustion method. The crystal structure and optical characteristics were investigated by methods: XRD, photoluminescence spectra (PL). The XRD result indicates the $Gd_2O_3:5\%Eu$ had cubic phase and the average particle size was about 32 nm. The photoluminescence showed the strong red emission with the ${}^5D_0-{}^7F_2$ electric dipole transition was dominant. The intensities of ${}^5D_0-{}^7F_J$ transitions depended on the symmetry of the local environment of Eu^{3+} ions and were described using the Judd-Ofelt analysis, using Ω_2 and Ω_4 intensity parameters derived from emission spectra data analysis. The calculated lifetime value was 1.8 ms and the quantum efficiency was 58,63%.

Giới thiệu chung

Trong nhiều năm qua, vật liệu nano phát quang ngày càng đóng vai trò quan trọng trong các lĩnh vực như quang xúc tác, pin năng lượng mặt trời, y sinh hay các thiết bị hiển thị...[1-5]. Trong đó, vật liệu nano phát quang có mạng nền hệ $Gd_2O_3-P_2O_5$ rất được quan tâm bởi vì chúng có độ ổn định về nhiệt và hóa học. Năm 2018, T.T.D.Hien và các thành viên trong nhóm nghiên cứu chúng tôi đã tổng hợp thành công và nghiên cứu tính chất quang của vật liệu $GdPO_4:Eu$. Kết quả cho thấy có sự chuyển từ pha hexagonal ($GdPO_4 \cdot H_2O$) sang pha monoclinic ($GdPO_4$) khi tăng nhiệt độ nung từ 300 đến 900 °C. Dưới bước sóng kích thích 273 nm, phổ huỳnh quang của vật liệu $GdPO_4:Eu$

thể hiện các chuyển dời đặc trưng của ion $Eu^{3+} {}^5D_0-{}^7F_J$ ($J = 0-4$), trong đó chuyển dời lưỡng cực từ ${}^5D_0-{}^7F_1$ chiếm ưu thế [6]. Năm 2020, K.K.M. Ngo và các cộng sự đã tổng hợp thành công và nghiên cứu tính chất quang của vật liệu $Gd_3PO_7:Eu$ dưới ảnh hưởng của nhiệt độ nung [7]. Kết quả cho thấy, vật liệu thu được có chất lượng tinh thể tốt, pha monoclinic, kích thước trung bình 20-30 nm. Dưới kích thích 252 nm, chuyển dời lưỡng cực điện ${}^5D_0-{}^7F_2$ chiếm ưu thế, vật liệu cho phát xạ đỏ, thời gian sống 1.8 ms, hiệu suất lượng tử 36%.

Trong nghiên cứu này, vật liệu được chọn là $Gd_2O_3:5\%Eu$ (trong hệ mạng nền $Gd_2O_3-P_2O_5$ mà nhóm đang nghiên cứu) đồng thời kết hợp với lý thuyết Judd-Ofelt nhằm tính toán các thông số quang

học cụ thể hơn. Có rất nhiều phương pháp chế tạo vật liệu như: thủy nhiệt[8], phản ứng pha rắn[9], đồng kết tủa[10], phản ứng nổ[11].... Chúng tôi tiếp tục chọn phương pháp phản ứng nổ trong nghiên cứu này, sử dụng ure mà nhiên liệu để tổng hợp vật liệu. Đây cũng là phương pháp mà chúng tôi đã tổng hợp hai loại vật liệu kể trên là $GdPO_4:Eu$ và $Gd_3PO_7:Eu$ [6,7]. Phương pháp này dựa trên phản ứng oxy hóa – khử giữa tác nhân oxy hóa là gốc nitrat (NO_3^-) và tác nhân khử là các chất hữu cơ có chứa nhóm amino ($-NH_2$).

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Tổng hợp vật liệu

Vật liệu $Gd_2O_3:5\%Eu$ được tổng hợp từ các hóa chất ban đầu là Gd_2O_3 (Aldrich 99.99%), Eu_2O_3 (Aldrich 99.99%), urea (Merck) và các dung dịch: HNO_3 65 % (Merck), NH_3 25 % (Merck) và nước cất 2 lần. Các dung dịch $Gd(NO_3)$ và $Eu(NO_3)_3$ được điều chế bằng cách hòa tan lần lượt Gd_2O_3 , Eu_2O_3 vào dung dịch HNO_3 65%. Lấy một lượng thể tích chính xác các dung dịch muối $Gd(NO_3)$ và $Eu(NO_3)_3$ với tỉ lệ số mol là 95:5 cho vào cốc thủy tinh, cô cạn để đuổi HNO_3 trong dung dịch. Sau lần cô cạn 3 lần, hỗn hợp muối nitrate của các kim loại được hòa tan thành dung dịch bằng 5 mL nước. Dung dịch muối này được cho thêm một lượng urea thích hợp, đun hỗn hợp trong 60 phút ở 50 °C, có khuấy từ. Cô cạn hỗn hợp, sau đó đem sấy sản phẩm qua đêm ở 80 °C thu được hỗn hợp bột màu trắng gọi là tiền chất. Theo nghiên cứu gần đây nhất của chúng tôi về vật liệu Gd_3PO_7 [7], nhiệt độ nung thích hợp để tổng hợp vật liệu Gd_3PO_7 là 900 °C. Vì vậy, đối với vật liệu $Gd_2O_3:5\%Eu$, nhiệt độ nung được lựa chọn là 900 °C trong thời gian 2 giờ nhằm mục đích so sánh các thông số quang học trong nghiên cứu sau này.

Đo đạc

Vật liệu được kiểm tra cấu trúc bằng phương pháp nhiễu xạ tia X được ghi trên máy D8 ADVANCE Bruker, phòng Hóa Phân tích, Viện Hóa Học, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Phổ huỳnh quang và kích thích huỳnh quang được đo trên thiết bị NanoLog (Horiba Jobin Yvon), Viện Tiên tiến Khoa học và Công nghệ, Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Lý thuyết J-O

Lý thuyết Judd-Ofelt (JO) có thể được sử dụng để đánh giá cấu trúc của môi trường cục bộ xung quanh ion đất hiếm cũng như tính toán các thông số quang học của ion đất hiếm. Chìa khóa của lý thuyết này chính là 3 thông số cường độ Ω_λ ($\lambda = 2, 4, 6$). Với ion Eu^{3+} , các thông số này được tính từ phổ phát xạ. Bốn chuyển dời phát xạ $^5D_0 \rightarrow ^7F_{1,2,4,6}$ được sử dụng để tính các thông số cường độ JO. Với chuyển dời lưỡng cực từ $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$, xác suất chuyển dời được tính theo công thức[12]:

$$A_{MD}(^5D_0 \rightarrow ^7F_1) = \frac{64\pi^4 \nu^3 n^3 S_{md}}{3h(2J+1)}$$

trong đó h là hằng số Planck, ν (cm^{-1}) tương ứng với năng lượng chuyển dời, J là tổng mômen góc, n là chiết suất của vật liệu. S_{md} là lực vạch của chuyển dời lưỡng cực từ, đại lượng này không phụ thuộc vào nền. Xác suất của các lưỡng cực điện $^5D_0 \rightarrow ^7F_J$ ($J = 2,4,6$) được tính theo công thức[13]:

$$A_{ED}(^5D_0 \rightarrow ^7F_J) = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3h(2J+1)} e^2 \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} \right] \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \|U^{(\lambda)}\|^2$$

Trong đó ν tương ứng với năng lượng của chuyển dời $^5D_0 \rightarrow ^7F_J$, e là điện tích của electron, $\|U^{(\lambda)}\|^2$ là yếu tố ma trận rút gọn kép của toán tử tenxơ đơn vị hạng $\lambda = 2, 4, 6$.

Như vậy, thông số Ω_λ có thể đánh giá được thông qua tỷ số giữa cường độ của chuyển dời $^5D_0 \rightarrow ^7F_J$ ($J=2,4,6$) theo công thức[12]:

$$\frac{\int I_J d\nu}{\int I_{F_1} d\nu} = \frac{A(^5D_0 \rightarrow ^7F_{2,4,6})}{A(^5D_0 \rightarrow ^7F_1)} = \left[\frac{e^2}{S_{md1}} \right] \left[\frac{\nu_J}{\nu_1} \right]^3 \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} \right] \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \|U^{(\lambda)}\|^2$$

Bảng 1. Giá trị $\|U^{(\lambda)}\|^2$ của các chuyển dời $^5D_0 \rightarrow ^7F_J$ ($J=2,4,6$) của ion Eu^{3+} [13,14]

Chuyển dời	$\ U^2\ ^2$	$\ U^4\ ^2$	$\ U^6\ ^2$
$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	0.00324	0	0
$^5D_0 \rightarrow ^7F_4$	0	0.00229	0
$^5D_0 \rightarrow ^7F_6$	0	0	0.00023

Xác suất chuyển dời từ trạng thái kích thích J xuống trạng thái J' đặc trưng cho cường độ huỳnh quang của chuyển dời $J \rightarrow J'$ được xác định bởi công thức sau[13]:

$$A(J, J') = A_{ed} + A_{md} = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3hc^3(2J+1)} \left[n \left(\frac{n^2+2}{3} \right)^2 S_{ed} + n^3 S_{md} \right]$$

Thời gian sống của mức kích thích J được tính toán như sau[13]:

$$\tau_R(J) = \frac{1}{A_T(J)}, \text{ trong đó } A_T(J) \text{ là tổng xác suất chuyển dời.}$$

Hiệu suất lượng tử: được sử dụng để đánh giá hiệu suất phát quang của một vật liệu, đại lượng này được đo bằng tỉ số giữa số photon phát ra và số photon bị

vật liệu hấp thụ trong cùng thời gian. Hiệu suất lượng tử được tính theo công thức[12]:

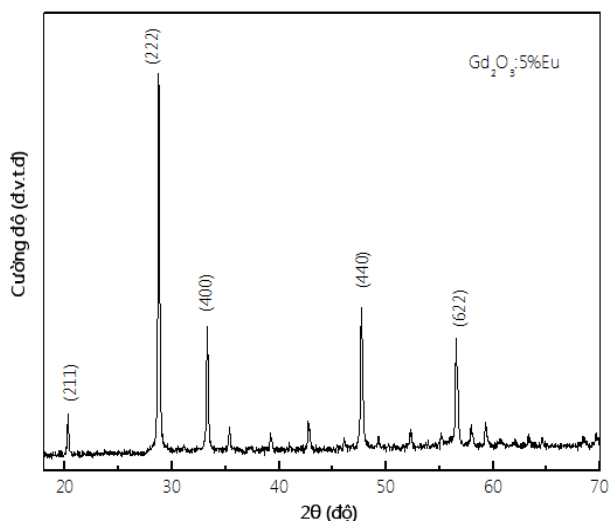
$$\eta = \frac{\tau_{\text{exp}}}{\tau_{\text{cal}}}$$

Tỉ số phân nhánh: được dùng tiên đoán cường độ tương đối của dải huỳnh quang từ một mức kích thích. Tỉ số phân nhánh lý thuyết được tính theo công thức[12]:

$$\beta_R(J \rightarrow J') = \frac{A_{J'}}{A_T(J)}$$

Kết quả và thảo luận

Hình 1 là là giản đồ nhiễu xạ của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$. Vật liệu tổng hợp được hoàn toàn đơn pha có cấu trúc tinh thể cubic, các đỉnh nhiễu xạ hoàn toàn phù hợp với thể chuẩn JCPDS 73-6280. Một vài đỉnh nhiễu xạ đặc trưng ở $2\theta=20.26^\circ$, 28.75° , 33.26° , 47.68° và 56.57° tương ứng với các mặt phẳng mạng (211), (222), (400), (440) và (622)[15].



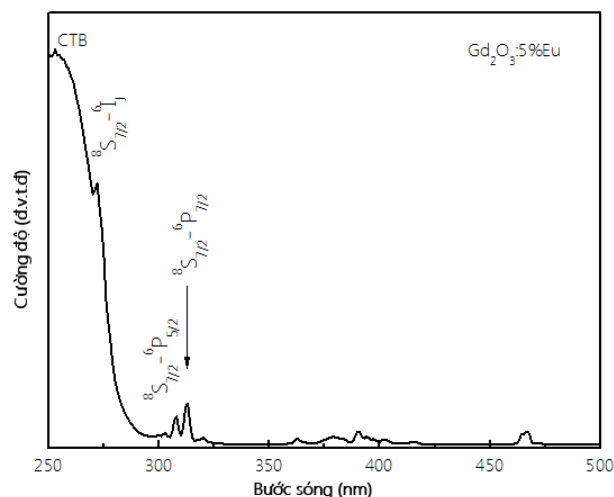
Hình 1: Giản đồ XRD của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$

Kích thước tinh thể trung bình là 32 nm được tính theo công thức Scherrer: $D = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos\theta}$, trong đó, D là kích

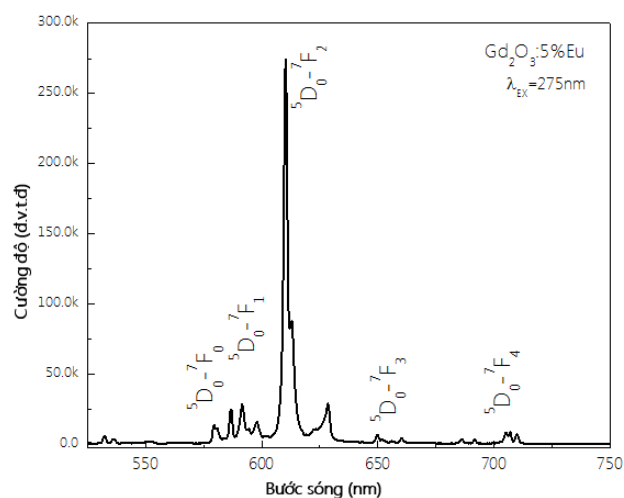
thước trung bình của các tinh thể (nm), λ là bước sóng của tia X (nguồn tia X ở đây là $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0,1541$ nm), θ là góc nhiễu xạ Bragg ứng với đỉnh nhiễu xạ cực đại (độ), β là độ bán rộng phổ của cực đại nhiễu xạ (FWHM) (rad).

Phổ kích thích huỳnh quang của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$ được trình bày ở Hình 2 bao gồm một dãy rộng ở vùng bước sóng ngắn và một dãy các đỉnh hẹp sắc nét ở vùng bước sóng dài. Vùng dãy rộng rất mạnh là vùng truyền điện tích (CTB) do electron di chuyển từ orbital 2p của oxy sang orbital trống của ion Eu^{3+} [7,16].

Các vạch kích thích quan sát được ở vùng 300 nm là các chuyển dời đặc trưng của Gd^{3+} , cụ thể là: vạch ở 275 nm được quy cho chuyển dời $^8\text{S}_{7/2} \rightarrow ^6\text{I}_1$ và các vạch ở 309 và 312 nm tương ứng được gán với các chuyển dời $^8\text{S}_{7/2} \rightarrow ^6\text{P}_{5/2}$, $^8\text{S}_{7/2} \rightarrow ^6\text{P}_{7/2}$ [17]. Một dãy các đỉnh hẹp sắc nét ở vùng bước sóng dài (350-500 nm) do chuyển dời 4f của europium [7].



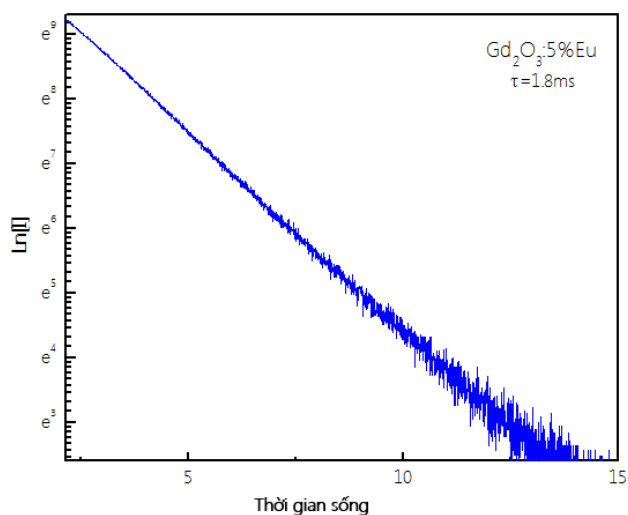
Hình 2: Phổ kích thích huỳnh quang của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$ cho phát xạ ở bước sóng 612 nm.



Hình 3: Phổ huỳnh quang của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$

Ion Eu^{3+} có cấu hình electron ở trạng thái cơ bản là $[\text{Xe}]4f^6$. Do đó, có số lượng tử spin tổng là $S = 3$ và có số lượng tử obitan tổng là $M_I = +3$. Vậy trạng thái cơ bản của ion Eu^{3+} là $^7\text{F}_J$ (với $J = 0 - 6$). Theo giản đồ Dieke, trạng thái kích thích có năng lượng thấp nhất của ion Eu^{3+} là $^5\text{D}_J$ (với $J = 0 - 3$). Hình 3 trình bày phổ huỳnh quang của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\%\text{Eu}$ nung ở 900 °C dưới bước sóng kích thích 275nm. Các tín hiệu trên phổ huỳnh quang đều thể hiện các chuyển dời đặc trưng của ion Eu^{3+} cụ thể là các vạch ở bước sóng 592 nm ($^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_1$), 612 nm ($^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_2$), 651 nm ($^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_3$) và 705 nm ($^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_4$). Về tính chất quang của Eu^{3+} ,

chuyển dời ${}^5D_0 - {}^7F_1$ là chuyển dời lưỡng cực từ và cường độ của nó phụ thuộc vào môi trường xung quanh của ion Eu^{3+} ; chuyển dời ${}^5D_0 - {}^7F_2$ là chuyển dời lưỡng cực điện và cường độ của nó nhạy với cấu trúc định xứ của ion Eu^{3+} . Trong trường hợp này, chuyển dời ${}^5D_0 - {}^7F_2$ có cường độ mạnh nhất là do cấu trúc định xứ của ion Eu^{3+} chiếm vị trí không có tâm đối xứng đảo [16].



Hình 4: Đường cong suy giảm huỳnh quang của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$

Đường cong suy giảm huỳnh quang đối với vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$ được trình bày ở Hình 4 cho chuyển dời ${}^5D_0 - {}^7F_2$, bước sóng kích thích và phát xạ tương ứng là 275 và 612 nm. Có thể thấy rằng, thời gian phát xạ của ion Eu^{3+} được xác định bằng hàm mũ đơn có phương trình $I = I_0 \exp(-t/\tau)$ [18]. Trong đó, I là cường độ huỳnh quang tại thời điểm t , I_0 là cường độ huỳnh quang tại thời điểm $t=0$, τ là thời gian sống. Kết quả tính toán cho thấy, thời gian sống là $\tau = 1.8$ ms.

Các thông số cường độ Ω_λ cung cấp thông tin hữu ích về đặc điểm của môi trường cục bộ xung quanh ion Eu^{3+} . Thông số Ω_2 nhạy với sự thay đổi của độ bất đối xứng ligand và độ đồng hóa trị trong liên kết Eu^{3+} -ligand. Trong khi đó, Ω_4 phụ thuộc vào độ cứng của môi trường mà ion đất hiếm được gắn vào: giá trị lớn của Ω_4 thể hiện độ cứng thấp của môi trường.

Bảng 2: Các thông số cường độ $\Omega_{2,4}$ của ion Eu^{3+} trong các mạng nền khác nhau

Mẫu	$\Omega_2 \cdot 10^{-20}$	$\Omega_4 \cdot 10^{-20}$	Tài liệu
$\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$	4.46	0.73	
$60\text{SnO}_2.40\text{SiO}_2:\text{Eu}$	3.98	3.86	[19]
$\text{LaF}_3:\text{Eu}$	1.19	1.16	[20]

Từ kết quả tính $\Omega_{2,4}$ cho vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$, có thể nhận thấy rằng giá trị Ω_2 trong vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$ lớn hơn so với các vật liệu khác như $60\text{SnO}_2.40\text{SiO}_2:\text{Eu}$ hoặc $\text{LaF}_3:\text{Eu}$. Điều này chỉ ra rằng độ bất đối xứng ligand, đồng hóa trị của liên kết Eu^{3+} -ligand trong $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ là cao hơn so với trong các nền được so sánh. Bên cạnh đó, độ cứng của môi trường xung quanh ion Eu^{3+} trong $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ cũng cao hơn so độ cứng của ligand trong các tinh thể này [12,14].

Bảng 3: Các thông số phát xạ của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$

${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_j$	β_{exp} (%)	β_{cal} (%)	τ_{exp} (ms)	τ_{cal} (ms)	η (%)
${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$	16.03	15.94			
${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$	77.85	78.25	1.8	3.07	58.63
${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$	6.12	5.81			

Tỷ số phân nhánh tính toán (β_{cal}) và thực nghiệm (β_{exp}) của dải này được trình bày ở Bảng 3 cho thấy có sự phù hợp tốt giữa tính toán và thực nghiệm. Ngoài ra, tỷ số phân nhánh thực nghiệm của chuyển dời ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ nhận giá trị lớn (78%) chứng tỏ hiệu suất phát xạ ánh sáng đỏ cao. Ngoài ra, hiệu suất lượng tử (η) của vật liệu khá lớn (58.63%). Các kết quả này chỉ ra triển vọng ứng dụng của vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ trong lĩnh vực khuếch đại quang và chiếu sáng.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, vật liệu $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$ đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp phản ứng nổ ở nhiệt độ 900 °C. Kết quả XRD cho thấy vật liệu thu được hoàn toàn đơn pha với kích thước trung bình 32 nm. Dưới bước sóng kích thích 275 nm, phổ phát xạ thể hiện các chuyển dời đặc trưng của ion $\text{Eu}^{3+} ({}^5D_0 \rightarrow {}^7F_j)$ trong đó cường độ phát xạ của chuyển dời ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ là mạnh nhất. Thời gian sống thực nghiệm là 1.8 ms. Dựa vào lý thuyết J-O, thông số Ω_2 có giá trị tương đối lớn chứng tỏ ion Eu^{3+} chiếm vị trí bất đối xứng trong mạng nền và đồng hóa trị của liên kết Eu^{3+} -ligand cao, thông số Ω_4 thấp chứng tỏ độ cứng của môi trường xung quanh ion Eu^{3+} trong $\text{Gd}_2\text{O}_3:5\% \text{Eu}$ là cao. Hiệu suất lượng tử chiếm 58.63%.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, Mã số: TSV2022-138.

Tài liệu tham khảo

1. Y. Wu, X. Xu, X. You, Q. Xiao, *Journal of Rare Earths* 38 (2020) 1086-1092. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.01.008>
2. P. T. Lien, N. T. Huong, T. T. Huong, H. T. Khuyen, N. T. N. Anh, N. D. Van, N. N. Tuan, V. X. Nghia, L. Q. Minh, *Journal of Nanomaterials* (2019) Article ID 3858439. <https://doi.org/10.1155/2019/3858439>
3. M. Kumari, S. Mondal, P. K. Sharma, *Journal of Alloys and Compounds* 776 (2019) 654-665. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.286>
4. D. Kumar, M. Sharma, O.P. Pandey, *AIP Conf. Proc.* 1536 (2013) 119-120. <https://doi.org/10.1063/1.4810129>
5. T.R. Jeena, A. Moses Ezhil Raj, M. Bououdina, *Mater. Res. Express.* 4 (2017) 025019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa5336>
6. T. T. D. Hien, P. D. Roan, N. T. Thanh, D. M. Tien, N. Vu, *Vietnam J. Chem.* 56 (2018) 793-797. <https://doi.org/10.1002/vjch.201800089>
7. K.K.M.Ngo, V.Nguyen, T.K.G.Lam, M. Stefanski, K. Grzeszkiewicz, D. Hreniak, *Int. J. Nanotechnol.*, Vol. 17, Nos. 7/8/9/10 (2020) 623-634. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2020.111329>
8. P. Li, Y. Liu, Y. Guo, X. Shi, G. Zhu, H. Zuo, *Ceramics International* 41 (2015) 6620-6630. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.109>
9. W. Di, X. Wang, B. Chen, H. Lai, X. Zhao, *Optical Materials* 27 (2005) 1386-1390. [doi:10.1016/j.optmat.2004.10.001](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.10.001)
10. D. J. Jovanović, Z. Antić, R. M. Krsmanović, M. Mitrić, V. Đorđević, B. Bártová, Miroslav D. Dramićanin, *Optical Materials* 35 (2013) 1797-1804. <https://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2013.03.012>
11. N. K. K. Minh, L. T. K. Giang, N. T. Nghia, N. Vu, *Vietnam J. Chem* 56(6E2) (2018) 300-303.
12. D. V. Phan, V. X. Quang, H. V. Tuyen, T. Ngoc, V. P. Tuyen, L. D. Thanh, *Journal of Luminescence* 216 (2019) 116748. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116748>
13. Li. Liu X. Chen, *Nanotechnology* 18 (2007) 255704. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/25/255704>
14. R.G. A. Kumar, S. Hata, K.G. Gopchandran, *Ceramics International* 39 (2013) 9125-9136. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.010>
15. L. QingBei, L. JianMing, W. JiHui, L. Zhang, W. JiangLi, W. Yue, *Materials Science* 56(28-29) (2011) 3114-3118. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4664-z>
16. N. K. K. Minh, T. B. Luan, L. T. K. Giang, N. T. Thanh, Tran T. K. Chi, D. Hreniak, N. Q. Luan, N. Vu, *Materials Transactions* 61 No. 8 (2020) 1564-1568. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-MN2019027>
17. T. T. D. Hiền, P. Đ. Roãn, N. Đ. Hội, N. K. K. Minh, N. Vũ, *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption* 10(2) (2021) 91-94. <https://doi.org/10.51316/jca.2021.034>
18. H. J. Devi, R. S. Loitongbam, W. R. Singh, *Materials Research Bulletin* 92 (2017) 74-84. <https://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.03.056>
19. B. Q. Thanh, T. N. Khiem, N. N. Ha, P. V. Do, *J. Lumin.* 201 (2018) 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.04.055>
20. Y. Liu, W. Luo, R. Li, G. Liu, M. R. Antonio, X. Chen, *J. Phys. Chem. C* 112 (2008) 686-694. <https://doi.org/10.1021/jp077001z>

ⁱ Đ.v.t.đ: đơn vị tương đối