

TỔNG HỢP VẬT LIỆU PHÁT QUANG CHUYỂN ĐỔI NGƯỢC $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ CHO ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG ĐÁNH DẤU HUỖNH QUANG

SYNTHESIS OF UPCONVERSION LUMINESCENT MATERIAL $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ FOR FLUORESCENCE LABELING APPLICATION

Nguyễn Văn Hải^{1,*}, Nguyễn Hữu Minh Nghĩa¹,
Hoàng Như Vân², Vũ Thị Xuân³

DOI: <http://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.144>

TÓM TẮT

Hệ vật liệu phát quang chuyển đổi ngược $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7:3\%\text{Ho}^{3+}, 10\%\text{Yb}^{3+}, x\%\text{Mo}^{6+}$ ($x = 0, 1, 3, 5$) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp đốt cháy. Độ tinh khiết pha, thành phần nguyên tố và hình thái bề mặt vật liệu được xác định bằng các phương pháp nhiễu xạ tia X, tán xạ năng lượng tia X và kính hiển hiển vi điện tử quét. Quá trình phát quang chuyển đổi ngược được khảo sát trên phổ huỳnh quang dưới bước sóng kích thích 980nm bằng diode laser. Nồng độ pha tạp Mo^{6+} đã được tối ưu hóa để đạt cường độ phát xạ mạnh nhất. Trên phổ huỳnh quang có sự phát xạ mạnh ở vùng màu lục (538 - 548 nm, $^5\text{F}_4/^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8$) và yếu ở vùng đỏ (667nm, $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$). Vật liệu $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ có độ tinh khiết màu cao và cường độ phát quang chuyển đổi ngược mạnh, có tiềm năng ứng dụng làm vật liệu chuyển đổi ngược màu lục trong đánh dấu huỳnh quang.

Từ khóa: Chuyển đổi ngược; $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$; chất phát quang; truyền năng lượng.

ABSTRACT

The $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7:3\%\text{Ho}^{3+}, 10\%\text{Yb}^{3+}, x\%\text{Mo}^{6+}$ ($x = 0, 1, 3, 5$) upconversion phosphors were synthesized by a combustion method. The phase purity, composition, and surface morphology were analyzed using X-ray diffraction, energy-dispersive X-ray spectroscopy, and scanning electron microscopy. The upconversion luminescence was investigated through photoluminescence spectroscopy under the excitation of a 980nm diode laser. The Mo^{6+} doping concentration was optimized to achieve the highest emission intensity. The fluorescence spectra exhibited strong green emission (538 - 548nm, $^5\text{F}_4/^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8$) and weak red emission (667nm, $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$). The $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ material demonstrated high color purity and strong upconversion luminescence intensity, making it a promising candidate for green upconversion materials in fluorescent labeling applications.

Keywords: Upconversion; $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$; phosphor; energy transfer.

¹Khoa Hóa học, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

²Khoa Khoa học và Kỹ thuật Vật liệu, Trường Đại học Phenikaa

³Khoa Khoa học Cơ bản, Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Email: hainv@hnue.edu.vn

Ngày nhận bài: 17/02/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

KÝ HIỆU

Ký hiệu

Đơn vị

Ý nghĩa

λ

nm

Bước sóng tia X

B

rad

Độ bán rộng tại đỉnh nhiễu xạ cực đại

2 θ

°

Góc nhiễu xạ

D

nm

Kích thước tinh thể trung bình

CHỮ VIẾT TẮT

BZO	$\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$
XRD	Nhiều xạ tia X
EDX	Phổ tán xạ năng lượng tia X
SEM	Kính hiển vi điện tử quét
PL	Huỳnh quang
UC	Chuyển đổi ngược
CCT	Nhiệt độ màu tương quan

1. GIỚI THIỆU

Các vật liệu phát quang UC pha tạp đất hiếm có khả năng chuyển đổi kích thích hồng ngoại gần thành ánh sáng khả kiến hoặc tử ngoại thông qua nhiều lần hấp thụ hoặc trao đổi năng lượng. Chúng nổi bật với các đặc tính như tính ổn định hóa học cao, khả năng xuyên sâu qua mô sinh học, tính tương thích sinh học cao, độc tính thấp, độ tinh khiết màu cao và dễ dàng chức năng hóa bề mặt. Nhờ hiệu suất phát xạ cao, các chất phát quang chuyển đổi ngược là vật liệu hấp dẫn trong nhiều lĩnh vực ứng dụng, điển hình là đánh dấu huỳnh quang trong y sinh, vật liệu bảo mật, tem chống hàng giả, ... [1-3].

Trong số các ion đất hiếm, các ion Ho^{3+} , Er^{3+} và Tm^{3+} có khả năng phát xạ UC do chúng có nhiều mức năng lượng và thời gian sống kéo dài [4-6]. Trong đó, ion Ho^{3+} có khả năng chuyển hóa bức xạ hồng ngoại gần thành bức xạ màu lục. Tuy nhiên, khả năng này bị giới hạn bởi ion Ho^{3+} ít có khả năng hấp thụ trực tiếp photon 980nm do bức xạ kích thích không tương thích với các mức năng lượng của ion Ho^{3+} [7]. Ngược lại, ion Yb^{3+} lại có tiết diện hấp thụ photon 980nm khá lớn, có khả năng đóng vai trò làm ion tăng nhạy. Khi kích thích bằng diode laser 980nm, ion Yb^{3+} sẽ hấp thụ bức xạ rồi truyền năng lượng sang Ho^{3+} , làm tăng cường độ phát quang UC [8-11]. Bên cạnh đó, việc đồng pha tạp MoO_4^{2-} để hình thành cặp tăng nhạy Yb^{3+} - MoO_4^{2-} có khả năng làm tăng mạnh cường độ huỳnh quang, tăng tỉ lệ màu lục/ màu đỏ trong quang phổ phát xạ, từ đó làm tăng độ tinh khiết màu [12, 13].

Trong nghiên cứu này, vật liệu $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ được tổng hợp bằng phương pháp đốt cháy và khảo sát khả năng phát quang UC màu lục, định hướng ứng dụng trong đánh dấu huỳnh quang.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**2.1. Phương pháp tổng hợp vật liệu**

Vật liệu $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ được tổng hợp từ các dung dịch muối tương ứng là $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 0,20M, $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ 0,20M, $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3$ 0,05M, $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3$ 0,10M và $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$

0,03M. Đầu tiên, các dung dịch muối được pha trộn theo tỉ lệ mol nguyên tố Bi : Zr : Ho : Yb : Mo = $(190 - x) : 200 : 3 : 10 : x$. Tiếp đó, dung dịch hỗn hợp được khuấy từ và gia nhiệt ở 80°C. Sau khi thêm urea (với số mol gấp 20 lần số mol vật liệu), dung dịch tiếp tục đun đuổi hơi nước đến khi thu được chất lỏng dạng đặc sánh. Hỗn hợp tạo thành được chuyển vào chén sứ và được nung sơ bộ ở nhiệt độ 400°C trong 4 giờ, thu được tiền chất. Cuối cùng, tiền chất được nghiền trong cối mã não, được ủ nhiệt ở nhiệt độ 600°C trong 4 giờ, thu được vật liệu phát quang $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$.

2.2. Phương pháp đo đạc

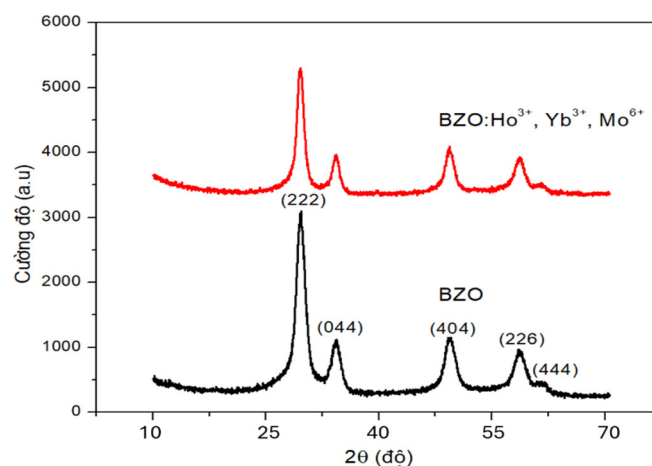
Vật liệu phát quang $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Mo}^{6+}$ được xác định cấu trúc, thành phần, hình thái, tính chất huỳnh quang bằng các phép đo được liệt kê ở bảng 1.

Bảng 1. Các phép đo đạc được sử dụng trong nghiên cứu

Phép đo	Máy đo	Địa điểm đo
XRD	D8-Advance Bruker	Viện Khoa học Vật liệu
EDX	Detector HORIBA, model 7593-H, gắn trên hệ FESEM HITACHI S-4800	Viện Khoa học Vật liệu
SEM	HITACHI S-4800	Viện Khoa học Vật liệu
PL	Nanolog, Horiba Jobin Yvon	Viện Tiên tiến Khoa học và Công nghệ (AIST)

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**3.1. Xác định cấu trúc, thành phần, hình thái**

Để xác định cấu trúc tinh thể, giản đồ XRD của các vật liệu BZO, $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$ ủ ở 600°C đã được thu nhận (hình 1).



Hình 1. Giản đồ XRD của vật liệu BZO và $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$

Hình 1 cho thấy, các vật liệu BZO và $\text{BZO}:\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$ có bốn pic nhiễu xạ chính ứng với các mặt phẳng phản xạ (222), (044), (404) và (226), phù hợp với thẻ chuẩn JCPDS 04-001-9350 của cấu trúc

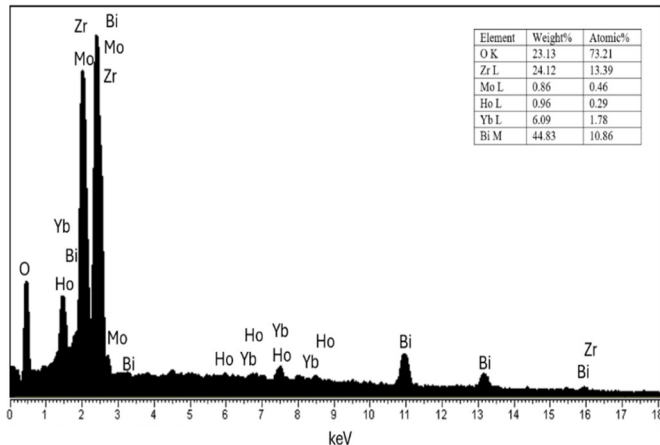
pyrochlore [4, 5]. Ngoài ra, trên giản đồ XRD không xuất hiện tín hiệu của các pha tạp chất như Bi_2O_3 hoặc ZrO_2 , chứng tỏ các vật liệu thu được có độ tinh khiết pha cao. Từ kết quả XRD, giá trị hằng số mạng ứng với cấu trúc lập phương của vật liệu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$ cũng đã được xác định là $a = 10,62\text{\AA}$.

Dựa trên độ bán rộng tại đỉnh nhiễu xạ cực đại (B , rad), kích thước tinh thể trung bình (D , nm) của BZO và $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$ được tính toán lần lượt là 5,4nm và 6,9nm bằng phương trình Scherrer:

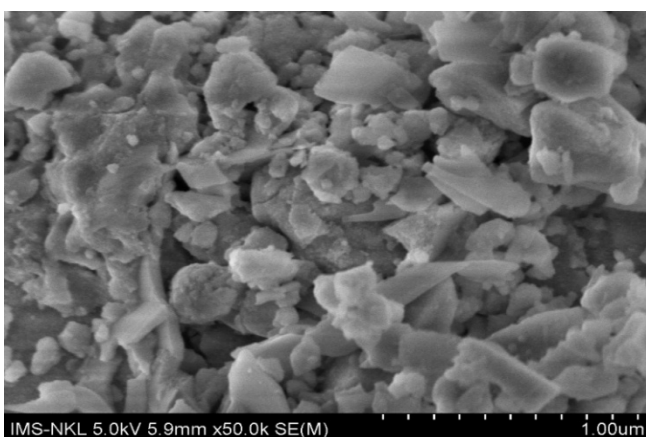
$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

Trong đó, λ (nm) là bước sóng tia X, θ (độ) là góc phản xạ Bragg.

Thành phần của các nguyên tố của vật liệu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$ đã được xác định bằng phép đo EDX (hình 2).



Hình 2. Phổ EDX của vật liệu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$



Hình 3. Ảnh SEM của vật liệu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 3\%\text{Mo}^{6+}$

Hình 2 cho thấy, các nguyên tố trong thành vật liệu đều xuất hiện tín hiệu đầy đủ và không lẫn tạp chất. Tỷ lệ các nguyên tố Bi : Zr : Ho : Yb : Mo trong vật liệu phù hợp tốt với tỷ lệ 184 : 200 : 3 : 10 : 3 trong thành phần dự kiến.

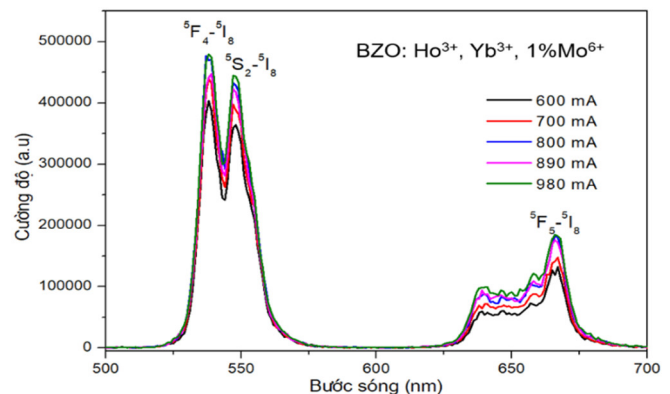
Hình thái bề mặt của vật liệu đã được khảo sát bằng ảnh SEM (hình 3).

Hình 3 cho thấy, các hạt vật liệu có dạng hình khối, phân bố khá rời rạc, kích thước hạt trung bình khoảng 150 - 200nm.

3.2. Khảo sát tính chất phát quang UC

a) Khảo sát công suất nguồn phát diode laser

Công suất nguồn phát diode laser ảnh hưởng đến cường độ phát quang UC và công suất nguồn phát tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện cấp cho nguồn phát. Để khảo sát công suất kích thích tối ưu cho sự phát quang UC, phổ huỳnh quang của các mẫu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, x\%\text{Mo}^{6+}$ ($x = 0, 1, 3, 5$) phụ thuộc cường độ dòng điện cấp cho nguồn phát đã được ghi lại. Hình 4 trình bày kết quả khảo sát tại nồng độ pha tạp 1% Mo^{6+} , ứng với mẫu có cường độ phát huỳnh quang cao nhất so với các mẫu còn lại trong cùng điều kiện khảo sát.



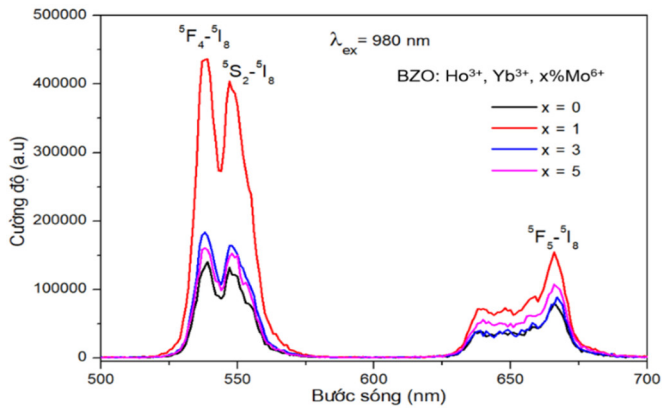
Hình 4. Phổ phát quang UC của vật liệu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, 1\%\text{Mo}^{6+}$ phụ thuộc cường độ dòng điện cấp cho nguồn phát diode laser

Hình 4 cho thấy, cường độ phát quang UC tăng dần khi tăng cường độ dòng điện từ 600mA đến 980mA. Tuy nhiên, cường độ huỳnh quang tăng chậm khi cường độ dòng điện tăng từ 890mA lên 980mA, cho thấy đây là vùng kích thích tối ưu. Do đó, trong nghiên cứu, nguồn phát diode laser được cấp dòng 980mA, tương ứng với công suất 700mW.

b) Tối ưu nồng độ Mo^{6+}

Để khảo sát ảnh hưởng của nồng độ Mo^{6+} pha tạp đến cường độ phát quang UC, phổ huỳnh quang của các mẫu $\text{BZO:Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, x\%\text{Mo}^{6+}$ ($x = 0, 1, 3, 5$) tại bước sóng kích thích 980nm đã được thu nhận (hình 5).

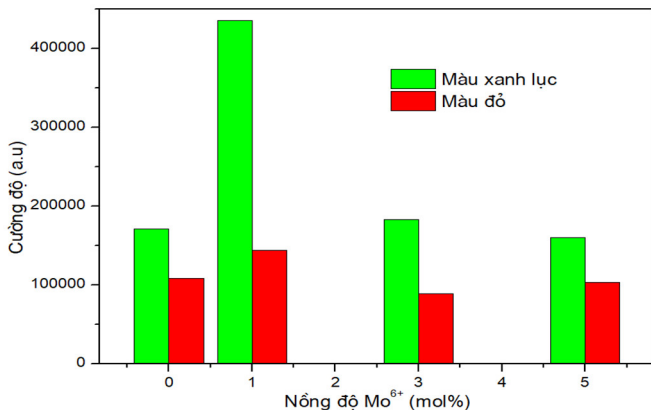
Hình 5 cho thấy, các chất phát quang UC phát xạ mạnh ở vùng màu xanh lục và phát xạ yếu ở vùng màu đỏ. Vùng phát xạ màu xanh lục ở dải bước sóng 538 - 548nm và màu đỏ ở dải bước sóng 640 - 670nm tương ứng với các bước chuyển $^5\text{F}_4/^5\text{S}_2 - ^5\text{I}_8$ và $^5\text{F}_5 - ^5\text{I}_8$ của Ho^{3+} [6-11].



Hình 5. Phổ phát quang UC của vật liệu BZO: Ho³⁺, Yb³⁺, x%Mo⁶⁺

Các mẫu pha tạp Mo⁶⁺ đều cho cường độ phát xạ UC cao hơn mẫu không pha tạp và đạt cực đại ứng ở giá trị nồng độ Mo⁶⁺ pha tạp là 1%. Ở các nồng độ pha tạp Mo⁶⁺ cao hơn, cường độ phát huỳnh quang giảm do hiện tượng dập tắt bởi nồng độ. Như vậy, việc đồng pha tạp Mo⁶⁺ đã tạo ra cặp dimer Yb³⁺-MoO₄²⁻ đóng vai trò truyền năng lượng hiệu quả hơn so với Yb³⁺ [12, 13].

Hơn nữa, khi pha tạp Mo⁶⁺, cường độ màu xanh lục có sự tăng mạnh và chiếm ưu thế hơn nhiều so với màu đỏ, đặc biệt ở nồng độ pha tạp 1% Mo⁶⁺ (hình 6).



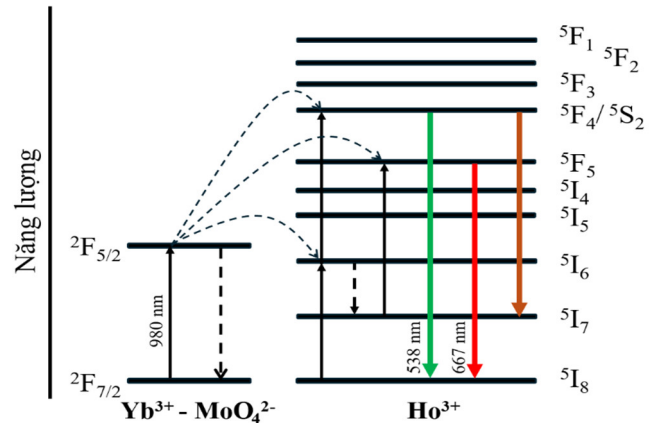
Hình 6. Tỷ lệ cường độ màu xanh/ đỏ trong quang phổ phát xạ của vật liệu

Hình 6 cho thấy, khi pha tạp Mo⁶⁺ sẽ làm tăng độ tinh khiết màu xanh lục trong quang phổ phát xạ. Như vậy, dưới bước sóng kích thích diode laser ở 980nm, vật liệu BZO:Ho³⁺,Yb³⁺,1%Mo⁶⁺ phát xạ mạnh màu xanh lục, có thể ứng dụng hiệu quả trong việc đánh dấu huỳnh quang.

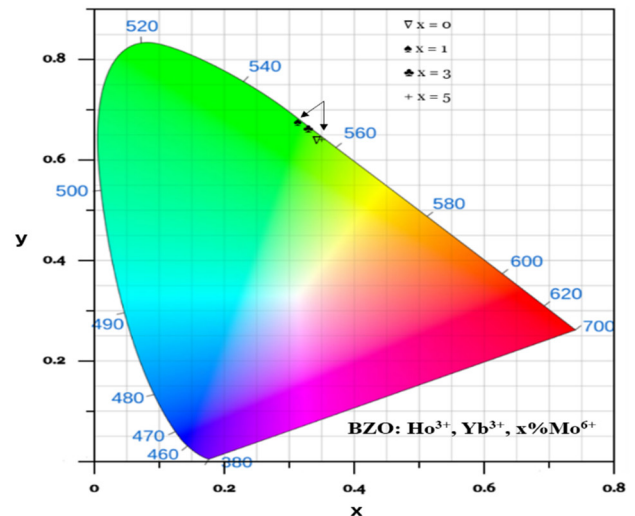
Bên cạnh đó, quá trình truyền năng lượng được minh họa thông qua giản đồ các mức hình năng lượng (hình 7).

Theo sơ đồ hình 7, ion Yb³⁺ hấp thụ bức xạ 980nm và chuyển từ mức năng lượng cơ bản ²F_{7/2} lên mức ²F_{5/2}. Tại đây, ion Yb³⁺ truyền năng lượng đã hấp thụ cho ion Ho³⁺ lân cận, rồi hồi phục không phát xạ về mức cơ bản. Sau khi nhận năng lượng từ Yb³⁺, ion Ho³⁺ chuyển từ mức cơ bản ⁵I₈ lên mức ⁵I₆. Tại đây, đa số các ion Ho³⁺ tiếp tục nhận

năng lượng để chuyển lên các mức ⁵F₄/⁵S₂. Các ion Ho³⁺ còn lại sẽ hồi phục không phát xạ về mức ⁵I₇, sau đó hấp thụ năng lượng từ các ion Yb³⁺ để chuyển lên mức ⁵F₅. Ở mức ⁵F₄/⁵S₂, phần lớn ion Ho³⁺ sẽ chuyển về mức ⁵I₈, kèm theo phát xạ ánh sáng màu xanh lục. Một phần nhỏ ion Ho³⁺ sẽ chuyển về mức ⁵I₇, tạo ra dải phát xạ cận hồng ngoại. Tại mức ⁵F₅, phần lớn ion Ho³⁺ ở mức sẽ chuyển dời về mức cơ bản ⁵I₈, kèm theo phát xạ ánh sáng màu đỏ. Các ion Ho³⁺ còn lại sẽ tiếp tục nhận năng lượng để chuyển lên các trạng thái cao hơn.



Hình 7. Sơ đồ mức năng lượng của Yb³⁺, Ho³⁺ và quá trình phát quang UC



Hình 8. Tọa độ màu của các mẫu BZO:Ho³⁺,Yb³⁺,x%Mo⁶⁺

Ngoài ra, tọa độ màu theo Ủy ban Quốc tế (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) của các mẫu tổng hợp được tính toán từ phổ PL được thể hiện trên hình 8.

Hình 8 cho thấy, khi pha tạp 1%Mo⁶⁺, tọa độ màu chuyển dịch mạnh về phía màu xanh lục. Tuy nhiên, khi tăng dần nồng độ Mo⁶⁺ lên 3% và 5%, tọa độ màu chuyển dịch gần về tọa độ của vật liệu khi không pha tạp Mo⁶⁺. Kết quả này chỉ ra rằng, ở nồng độ 1%Mo⁶⁺ thì màu xanh lục có độ tinh khiết cao nhất.

Để có thể xác định được độ tinh khiết về màu sắc của vật liệu, tọa độ màu của chất phát huỳnh quang được xác định theo công thức sau [14]:

$$\text{Độ tinh khiết màu} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\sqrt{(x_d-x_i)^2 + (y_d-y_i)^2}} \times 100\% \quad (2)$$

Trong đó (x, y) là tọa độ màu của mẫu; $(x_i = 0,3333$ và $y_i = 0,3333)$ là tọa độ màu của nguồn sáng trắng; (x_d, y_d) là tọa độ màu của bước sóng chính của vật liệu.

Ngoài ra, nhiệt độ màu tương quan của vật liệu được tính toán bằng phương trình McCammys [14]:

$$\text{CCT} = -449n^3 + 3525n^2 - 6823n + 5520 \quad (3)$$

Trong đó $n = (x-x_e)/(y-y_e)$, với (x_e, y_e) là tọa độ màu của điểm chuẩn (0,3320; 0,1858).

Tọa độ màu, nhiệt độ màu tương quan và độ tinh khiết màu được trình bày ở bảng 2.

Bảng 2. Tọa độ màu, độ tinh khiết màu và nhiệt độ màu tương quan của vật liệu

Vật liệu BZO:Ho ³⁺ ,Yb ³⁺ ,x%Mo ⁶⁺	(x; y)	Độ tinh khiết (%)	CCT (K)
x = 0	(0,342; 0,639)	70,6	5364
x = 1	(0,313; 0,675)	78,0	5782
x = 3	(0,328; 0,661)	75,1	5571
x = 5	(0,349; 0,641)	71,2	5271

4. KẾT LUẬN

Vật liệu phát quang BZO:3%Ho³⁺, 10%Yb³⁺, x%Mo⁶⁺ đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp đốt cháy. Vật liệu thu được có cường độ phát xạ UC mạnh nhất ứng với nồng độ pha tạp Mo⁶⁺ là 1%. Sự hình thành cặp dimer Yb³⁺-MoO₄²⁻ đóng vai trò là trung tâm tăng nhạy hiệu quả để nhận năng lượng kích thích rồi truyền năng lượng cho tâm phát quang Ho³⁺. Quang phổ phát xạ của BZO:Ho³⁺,Yb³⁺,1%Mo⁶⁺ có tọa độ màu nằm trong vùng xanh lục với độ tinh khiết màu gần 80% dưới kích thích diode laser 980nm. Điều này cho thấy, khi chiếu sáng laser, bột phát quang này sẽ phát ra quang phổ xanh lam với cường độ mạnh, có tiềm năng ứng dụng hiệu quả trong đánh dấu huỳnh quang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W. Xiaofeng, et al, "pconversion nanoparticles for differential imaging of plant cells and detection of fluorescent dyes," *Journal of rare earths*, 34, 2, 208, 2016.
- [2]. B. Yang, H. Chen, Z. Zheng, G. Li, "Application of upconversion rare earth fluorescent nanoparticles in biomedical drug delivery system," *Journal of Luminescence*, 223, 117226, 2020.

[3]. N. Dubey, S. Chandra, "Upconversion nanoparticles: Recent strategies and mechanism based applications," *Journal of Rare Earths*, 40, 9, 1343-1359, 2022.

[4]. M. Rosales, J. Oliva, H. Desirena, P. Salas, "Effect of Urea and Thiourea on the color emission of (Y_xBi_{1-x})₂Zr₂O₇:Er³⁺, Yb³⁺ upconversion phosphors," *Optical Materials* 157, 116307, 2024.

[5]. A.S. Rajashekharaiyah, et al, "NUV light-induced visible green emissions of Erbium-doped hierarchical Bi₂Zr₂O₇ structures," *Optical Materials*, 95, 109237, 2019.

[6]. M Azam, D. K. Mohanty, V. K. Rai, K. Singh, "Luminescence and Judd-Ofelt study of Ho³⁺/Ho³⁺-Yb³⁺ doped/ codoped lead tellurite glasses for multifunctional applications," *Journal of Luminescence*, 239, 118319, 2021.

[7]. S. Liu, et al, "Intense upconversion luminescence and energy-transfer mechanism of Ho³⁺/Yb³⁺ co-doped SrLu₂O₄ phosphor," *Journal of the American Ceramic Society*, 100, 8, 3530-3539, 2017.

[8]. N. An, et al, "Improved temperature sensing performance of YAG: Ho³⁺/Yb³⁺ by doping Ce³⁺ ions based on up-conversion luminescence," *Journal of Alloys and Compounds*, 843, 156057, 2020.

[9]. J. Bi, et al, "Tunable upconversion luminescence in new Ho³⁺/Yb³⁺-doped SrBi₄Ti₄O₁₅ photochromic ceramics for switching application," *Journal of the American Ceramic Society*, 104, 4, 1785-1796, 2021.

[10]. M. K. Mahata, et al, "Upconversion photoluminescence of Ho³⁺-Yb³⁺ doped barium titanate nanocrystallites: optical tools for structural phase detection and temperature probing," *Scientific Reports*, 10, 8775, 2020.

[11]. C. Yun, C. Zhang, X. Miao, Z. Li, Y. Ping, "Effective enhancement on mid-infrared fluorescence emission of Ho³⁺/Yb³⁺ doped tellurite glass introduced Ag nanoparticles," *Optical Materials*, 115, 111025, 2021.

[12]. Y. Y. He, X. L. Liu, B. S. Cao, Z. Q. Feng, B. Dong, "A general approach for selective enhancement of green upconversion emissions in Er³⁺-doped oxides by Yb³⁺-MoO₄²⁻ dimer sensitizing," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 66(2), 312-316, 2013.

[13]. H. T. Nam, P. D. Tam, N. V. Hai, H. N. Van, "Multifunctional optical thermometry using dualmode green emission of CaZrO₃:Er/Yb/Mo perovskite phosphors," *RSC Adv.*, 13, 14660, 2023.

[14]. H. Duan, R. Cui, M. Zhang, C. Deng, "Photoluminescence properties and energy transfer studies of Ba₂YAlO₅: Sm³⁺, Eu³⁺ orange-red phosphors," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 238, 166774, 2021.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Van Hai¹, Nguyen Huu Minh Nghia¹, Hoang Nhu Van², Vu Thi Xuan³

¹Faculty of Chemistry, Hanoi National University of Education, Vietnam

²Faculty of Materials Science and Engineering, Phenikaa University, Vietnam

³Faculty of Basic Sciences, University of Transport and Communications, Vietnam