

CHẾ TẠO VẬT LIỆU NHIỆT PHÁT QUANG $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ VÀ XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ ĐỘNG HỌC THEO MÔ HÌNH OTOR

MAKING THERMOLUMINESCENCE MATERIALS $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ AND DETERMINING PARAMETERS KINETICS OF MODEL OTOR

Trần Phú Cường

ĐH Lạc Hồng, Đồng Nai.

Lê Sơn Hải

ĐH Sư Phạm Kỹ Thuật TP. HCM.

Huyền Chí Cường

ĐH Khoa học Tự nhiên TP. HCM

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi chế tạo vật liệu nhiệt phát quang $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ bằng hai phương pháp: phương pháp tái kết tinh trong môi trường H_2SO_4 nóng và đậm đặc, phương pháp nung nhiệt. Mẫu vật liệu tạo ra được chiếu xạ gamma với nguồn ^{60}Co với liều hấp thụ 4,8kGy, rồi ghi nhận đường nhiệt phát quang tích phân của mỗi mẫu được tạo ra từ mỗi phương pháp trên. Tiếp theo, phân tích đường nhiệt phát quang tích phân bằng phương pháp giải chập kết hợp với các phương pháp phụ trợ khác như: xóa nhiệt, sườn lên ban đầu, hình dạng đỉnh, toàn đỉnh; và xác định các thông số động học của mô hình một bẫy một tâm tái hợp (One Trap One Recombination – OTOR)

ABSTRACT

In this paper, we make up thermoluminescence of materials $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ with methods: re-crystallisation method in hot and dense H_2SO_4 heat method. The sample was gamma radiated by ^{60}Co (4.8kGy) to get the thermoluminescence spectroscopy. After that, we analysed the spectroscopy by deconvolution method and other methods: thermal cleaning method, initial rise method, peak shape method, whole glow peak method. Based on these results, we have calculated the parameters of One Trap One Recombination – OTOR mode.

Keywords: ThermoLuminescence, TL integral glow curve, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$, re-crystallisation.

I. GIỚI THIỆU

Nhiệt phát quang (ThermoLuminescence – TL) hay quá trình phát quang cưỡng bức nhiệt (Thermolly Stimulated Luminescence – TSL), là một dạng phát quang khi đốt nóng các chất điện môi hay bán dẫn mà trước đó đã được chiếu xạ bằng bức xạ ion hóa [1, tr.1], [4, pp.3], [7, pp.1].

Mô hình đơn giản có hai mức năng lượng định xứ, một bẫy điện tử và một tâm tái hợp (One Trap One Recombination – OTOR) [1, tr.18-21], [7, pp.66-70] (xem hình 1).

Nếu giả thuyết nồng độ điện tử trên vùng dẫn nhỏ hơn nhiều lần nồng độ điện tử trên bẫy, tốc độ thay đổi nồng độ điện tử trên vùng dẫn nhỏ hơn nhiều lần tốc độ thay đổi nồng

độ điện tử trên bẫy, mọi tái hợp đều phát xạ thì cường độ nhiệt phát quang được tính theo

biểu thức:
$$I_{TL}(t) = -\frac{dn_h}{dt} = \frac{pn^2}{n + R(N - n)}$$
, với

$$R = \frac{A}{B} \quad (1)$$

Trong đó:

n_c là nồng độ điện tử trên vùng dẫn (m^{-3}).

n_h là nồng độ lỗ trống ở tâm tái hợp (m^{-3}).

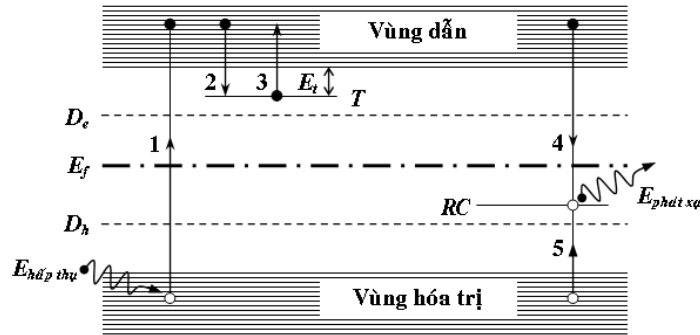
n là nồng độ điện tử trên bẫy (m^{-3}).

N là nồng độ bẫy điện tử (m^{-3}).

A là hệ số tái bắt điện tử vào bẫy ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

B là hệ số điện tử tái hợp với tâm tái hợp ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

p là xác suất giải thoát điện tử khỏi bẫy trong một giây (s^{-1}).



Hình 1. Mô hình đơn giản của nhiệt phát quang bao gồm hai mức đối với hạt tải điện là điện tử: mức T –bẫy điện tử (Trap) và mức RC –bẫy lỗ trống đóng vai trò tâm tái hợp (Recombination Center–RC). Mức nằm giữa là mức Fermi– E_f , trên mức Fermi là mức D_e mà các điện tử trên đó có xác suất tái hợp bằng xác suất thoát bẫy khi kích thích nhiệt. Các dịch chuyển cho phép:

(1) là quá trình ion hóa.

(2), (5) là quá trình bẫy điện tử và lỗ trống tương ứng.

(3) là quá trình giải thoát điện tử khỏi bẫy bằng nhiệt.

(4) là quá trình phát quang khi tái hợp.

Nếu thêm giả thuyết các điện tử được giải thoát khỏi bẫy nhờ năng lượng nhiệt sẽ nhanh chóng tái hợp với tâm tái hợp thì từ (1), dẫn ra phương trình động học bậc một:

$$I_{TL}(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{kT'}\right) dT'\right) \quad (2)$$

Trong đó:

T_0, T là nhiệt độ của vật liệu tương ứng ở thời điểm ban đầu và sau, ($^{\circ}\text{C}$).

n_0 là nồng độ điện tử trên bẫy ở nhiệt độ T_0 , ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

s là tích số của tần số mà điện tử va vào thành hố thế với hệ số phản xạ, (s^{-1}).

E_t là năng lượng hoạt hóa bẫy hay độ sâu bẫy, (J).

β là hệ số nâng nhiệt ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$).

I_{TL} là cường độ nhiệt phát quang, là số photon phát xạ trong một giây bằng tốc độ tái hợp của điện tử với lỗ trống, ($\text{photon} \cdot \text{s}^{-1}$).

Nếu bổ sung các giả thuyết nồng độ bẫy điện tử lớn hơn rất nhiều so với nồng độ điện tử trong bẫy, các điện tử tự do có thể bị tái bắt với xác suất tái bắt lớn hơn rất nhiều so với xác suất tái hợp thì từ (1), dẫn ra phương trình động học bậc hai:

$$I_{TL}(T) = n_0 s'' \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \left(1 + \frac{s''}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{kT'}\right) dT'\right)^{-2}, \text{ với } s'' = \frac{n_0}{NR} s \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Trong nhiều trường hợp, quá trình nhiệt phát quang không tuân theo động học bậc một hoặc bậc hai và (1) viết lại như sau:

$$I_{TL}(T) = -\frac{dn_h}{dt} = \frac{n^b}{(NR)^{b-1}} s \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \quad (4)$$

Dẫn ra phương trình động học bậc tổng quát:

$$I_{TL}(T) = n_0 s'' \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \left[1 + (b-1) \frac{s''}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{kT'}\right) dT'\right]^{\frac{b}{b-1}}, \text{ với } s'' = \left(\frac{n_0}{NR}\right)^{b-1} s \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

Đường cong phát quang tích phân (TL integral glow curve) của một vật liệu bao giờ cũng là một đường cong phức tạp gồm nhiều đỉnh đơn chồng chập một phần lên nhau. Nhiệm vụ của giải chập là phân giải đường cong tổng hợp đó, xem nó bao gồm mấy đỉnh đơn và tìm ra các thông số vật lý đặc trưng cho các bẫy ứng với các đỉnh đó. Một trong những phương pháp được sử dụng rộng rãi hiện nay khi tiến hành giải chập là phương pháp làm khớp (fitting) giữa đường cong lý thuyết và đường cong nhiệt phát quang thu được từ phép đo thực nghiệm^{[2], [3]}.

Các kết quả nhận được từ việc giải chập được so sánh với một số tác giả khác và áp dụng để kiểm soát quá trình chế tạo các vật liệu nhiệt phát quang $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ có thể đo liều lượng bức xạ ion hóa.

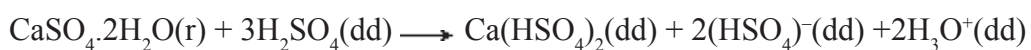
II. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

2.1. Chế tạo vật liệu

2.1.1. Cơ sở lý thuyết, quy trình và các tham số của phương pháp tái kết tinh

Cơ sở lý thuyết

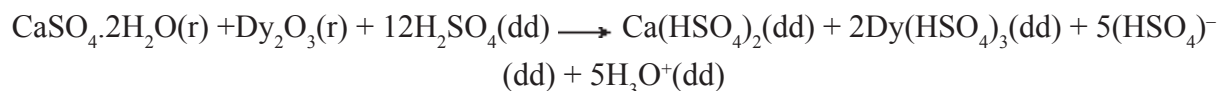
a. Phản ứng giữa $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ với H_2SO_4 đậm đặc dư:



b. Phản ứng giữa bột Dy_2O_3 với H_2SO_4 đậm đặc dư:



c. Phản ứng giữa $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ và Dy_2O_3 với H_2SO_4 đậm đặc dư:



d. Cung cấp nhiệt để cô cạn sản phẩm của phản ứng (c) ở 300°C , nhận được tinh thể CaSO_4 với Dy cộng kết đồng hình trên bề mặt của tinh thể CaSO_4 .

Sơ đồ quy trình (xem hình 2)

Thuyết minh quy trình

Nguyên liệu đầu vào là bột thạch cao trộn với bột Dy_2O_3 , có khối lượng $m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}$ và $m_{\text{Dy}_2\text{O}_3}$ xác định trước, trong một ống thạch anh cùng với dung dịch H_2SO_4 98,08% có thể tích $V_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ chọn trước. Tiếp theo là cấp nhiệt cho dung dịch trong ống thạch anh bằng một bếp điện có điều chỉnh nhiệt độ từ nhiệt độ phòng đến nhiệt độ cuối T_C , lượng hơi H_2SO_4 được dẫn qua ống sinh hàn và sục qua dung dịch NaOH để được trung hòa, cho đến khi

dung dịch này đặc sệt lại, rồi thành bột khô hẳn. Điều chỉnh nhiệt độ bếp điện xuống gần nhiệt độ phòng rồi cho nước cất vào để rửa bột, cho hỗn hợp nước và bột này vào một cái chum sứ, đưa vào lò sấy để sấy khô nước. Sau đó, điều chỉnh nhiệt độ lò nung để ủ nhiệt với nhiệt độ ủ T_U và bắt đầu tính thời gian ủ t_U . Sau cùng, cho bột vào cối sứ để nghiền và chiết ra thành từng mẫu nhỏ sản phẩm để chuẩn bị được chiếu xạ.

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} (\text{mg}) = 3001,8 \pm 0,6 \quad \& \quad m_{\text{Dy}_2\text{O}_3} (\text{mg}) = 6,6 \pm 0,3$$

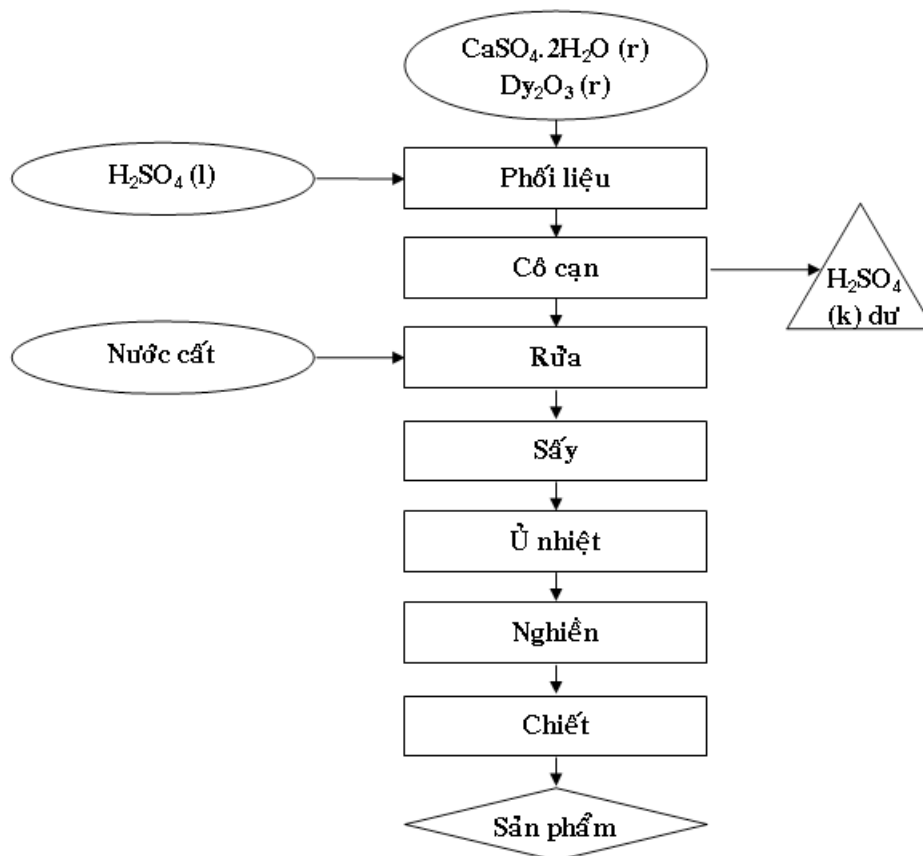
$$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} (\text{mL}) = 30$$

Các tham số của quy trình $n(\% \text{mol}) = 92,316 \frac{m_{\text{Dy}_2\text{O}_3}}{m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}} = 0,20 \pm 0,01$

$$T_C (^\circ\text{C}) = 300$$

$$T_U (^\circ\text{C}) = 400 \quad \& \quad t_U (\text{h}) = 1$$

Đánh số sản phẩm: "05-38-100 mV"



Hình 2. Sơ đồ quy trình điều chế $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ bằng phương pháp tái kết tinh.

2.1.2. Cơ sở lý thuyết, quy trình và các tham số của phương pháp nung nhiệt

Cơ sở lý thuyết: phản ứng trực tiếp giữa $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ và Dy_2O_3 với xúc tác nhiệt.

Sơ đồ quy trình (xem hình 3)

Thuyết minh quy trình

Nguyên liệu đầu vào là bột thạch cao trộn với bột Dy_2O_3 , có khối lượng $m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}$ và $m_{\text{Dy}_2\text{O}_3}$ xác định trước, trong một cái chum sứ cùng với ethanol có thể tích V_{ETHANOL} và khuấy cho đều. Tiếp theo là cho hỗn hợp trong chum sứ vào lò sấy, có nhiệt độ sấy T_s và thời gian

sấy t_s , để làm bay hơi nhanh ethanol. Sau đó, đưa chum sứ chứa hỗn hợp vào lò nung, điều chỉnh nhiệt độ lò đến nhiệt độ nung T_N , rồi bật lò đồng thời tính thời gian nung trong một khoảng thời gian t_N . Khi nung hoàn tất, lấy chum ra và làm lạnh nhanh bằng gió của một cái quạt ở nhiệt độ phòng. Khi nhiệt độ chum sứ trở về nhiệt độ phòng, lại đưa nó vào một lò nung để ủ nhiệt, điều chỉnh nhiệt độ ủ T_U và bắt đầu tính thời gian ủ t_U . Sau cùng, đổ bột trong chum vào cối sứ để nghiền và chiết ra thành từng mẫu nhỏ sản phẩm để chuẩn bị được chiếu xạ.

Các tham số của quy trình

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} (\text{mg}) = 3001,0 \pm 0,6 \quad \& \quad m_{\text{Dy}_2\text{O}_3} (\text{mg}) = 6,5 \pm 0,3$$

$$V_{\text{ETHANOL}} (\text{mL}) = 10$$

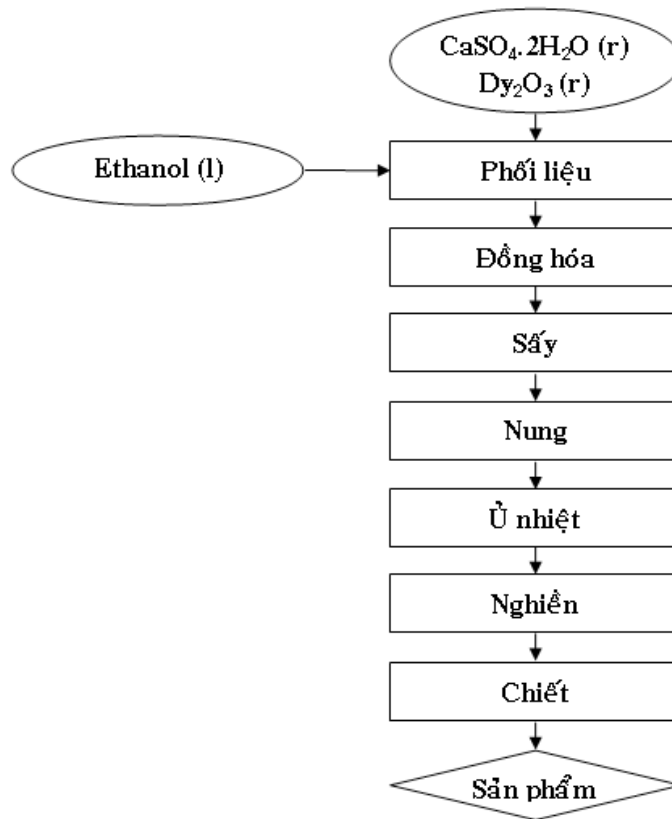
$$n(\% \text{mol}) = 92,316 \frac{m_{\text{Dy}_2\text{O}_3}}{m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}} = 0,20 \pm 0,01$$

$$T_s (^\circ\text{C}) = 70 \quad \& \quad t_s (\text{h}) = 2$$

$$T_N (^\circ\text{C}) = 1000 \quad \& \quad t_N (\text{h}) = 1,5$$

$$T_U (^\circ\text{C}) = 400 \quad \& \quad t_U (\text{h}) = 2$$

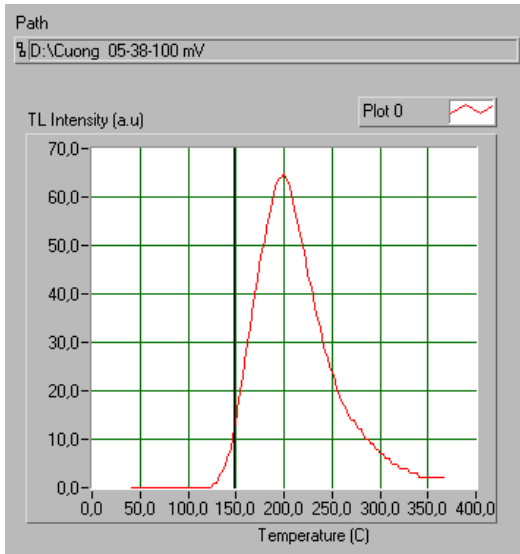
Đánh số sản phẩm: “6G150P1000C-41-50mV”



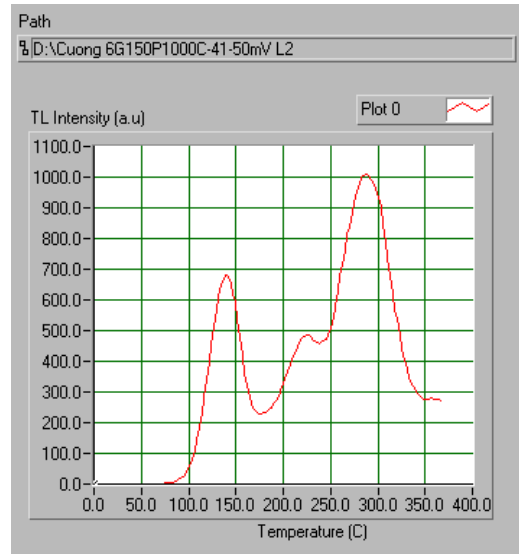
Hình 3. Sơ đồ quy trình điều chế $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}^{3+}$ bằng phương pháp nung.

2.2. Chiếu xạ và ghi nhận đường nhiệt phát quang tích phân

Mẫu vật liệu tạo ra từ mỗi phương pháp trên được chiếu bức xạ gamma với nguồn ^{60}Co với liều hấp thụ 4,8kGy. Sau đó, mỗi mẫu được ghi nhận đường nhiệt phát quang tích phân, xem hình 4.



Hình 4a. Đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp tái kết tinh.



Hình 4b. Đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp nung.

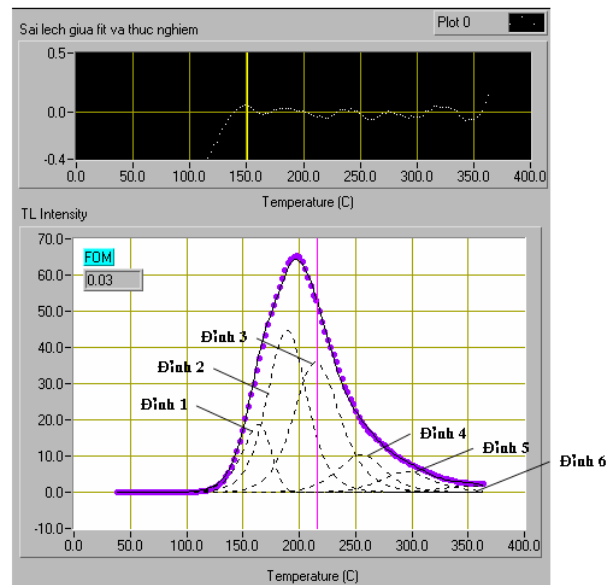
2.3. Phân tích đường nhiệt phát quang tích phân bằng phương pháp giải chấp kết hợp với các phương pháp phụ tr

2.3.1. Mẫu "05mol-38-100 mV"

2.3.1.1. Làm khớp tự do: cho kết quả sáu đỉnh đơn với Figure Of Merit –

$$FOM = \frac{\sum_{i=1}^N |I_{TNi} - I_{LTi}|}{\sum_{i=1}^N I_{LTi}} = 0,03;$$

trong đó: I_{TNi} , I_{LTi} là cường độ TL thực nghiệm, lý thuyết thứ i trong N lần ghi nhận; với $N=130$ là số lượng cường độ TL ghi nhận trong một lần đo.



Hình 5. Đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp tái kết tinh khi đã làm khớp tự do với sáu đỉnh. Đường liền nét là đường làm khớp, đường đứt nét là các đỉnh làm khớp, các chấm tròn là các số liệu thực nghiệm.

Bảng 1. Các thông số bẫy và thực nghiệm khi làm khớp tự do đường cong nhiệt phát quang tích

phân của vật liệu $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp tái kết tinh.

STT	$E_t(\text{eV})$	$S^*(\text{s}^{-1})$	b	$n_0(\text{m}^{-3})$	$\beta(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1,378	$8 \cdot 10^{14}$	1,12	490	1,4
2	1,422	$3 \cdot 10^{14}$	1,80	1632	1,4
3	1,430	$5 \cdot 10^{13}$	2,00	1530	1,4
4	1,567	$9 \cdot 10^{13}$	1,80	440	1,4
5	1,703	$1 \cdot 10^{14}$	2,80	269	1,4
6	1,878	$1 \cdot 10^{14}$	1,50	80	1,4

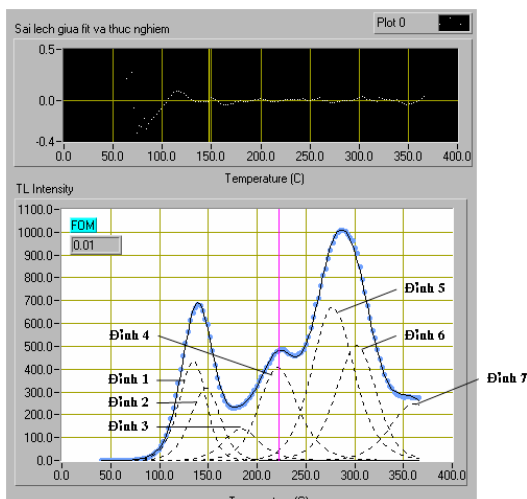
2.3.1.2. Làm khớp có điều kiện:

Chưa thể thực hiện được vì các đỉnh 1, 2, 3 phủ lên nhau ở phần sườn lên ban đầu và các đỉnh 4, 5, 6 có cường độ phát quang nhỏ; do đó, không thể áp dụng các phương pháp phụ trợ cho mỗi đỉnh để tìm các thông số động học của các bẫy trong vật liệu $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ chế tạo từ phương pháp tái kết tinh.

2.3.2. Mẫu “6G150P1000C-41-50mV L2”

2.3.2.1. Làm khớp tự do: cho kết quả bảy đỉnh đơn với $FOM = \frac{\sum_{i=1}^N |I_{TNi} - I_{LTi}|}{\sum_{i=1}^N I_{LTi}} = 0,01$;

trong đó: I_{TNi} , I_{LTi} là cường độ TL thực nghiệm, lý thuyết thứ i trong N lần ghi nhận; với $N=130$ là số lượng cường độ TL ghi nhận trong một lần đo.



Hình 6. Đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp nung khi đã làm khớp tự do với bảy đỉnh. Đường liền nét là đường làm khớp, đường đứt nét là các đỉnh làm khớp, các chấm tròn là các số liệu thực nghiệm.

2.3.2.2. Làm khớp có điều kiện

Bảng 3. Bảng tóm tắt các thông số năm đỉnh của $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ được điều chế từ phương pháp

Bảng 2. Các thông số bẫy và thực nghiệm khi làm khớp tự do đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4: \text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp nung.

STT	$E_t(\text{eV})$	$S^*(\text{s}^{-1})$	b	$n_0(\text{m}^{-3})$	$\beta(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1,269	$5,2 \cdot 10^{14}$	1,50	12600	1,4
2	1,280	$2,2 \cdot 10^{14}$	1,60	10000	1,4
3	1,393	$2,2 \cdot 10^{13}$	2,00	5312	1,4
4	1,570	$2,0 \cdot 10^{13}$	2,00	16950	1,4
5	1,682	$2,0 \cdot 10^{14}$	1,90	29800	1,4
6	1,759	$2,0 \cdot 10^{14}$	1,60	2100	1,4
7	1,940	$1,8 \cdot 10^{14}$	2,00	12900	1,4

nung. Các thông số này được xác định từ các phương pháp phụ trợ: (a) Phương pháp sườn lên ban đầu; (b) Phương pháp Chen; (c) Phương pháp xóa nhiệt; (d) Phương pháp toàn đỉnh (đỉnh 1).

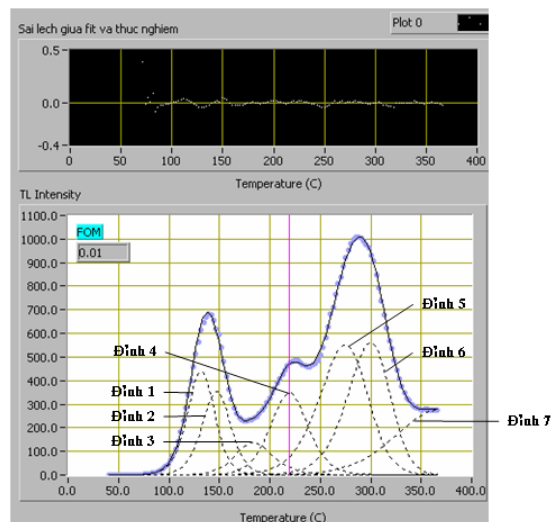
Đỉnh	Phương pháp	E(eV)	$\sigma[E](\text{eV})$	b	$\Delta [b]$	R ²
1	Sườn lên ban đầu	1,392	0,010	-	-	99,90
	Sườn lên ban đầu*	1,383	0,012	-	-	99,85
	Chen	1,25	0,10	1,6	0,4	-
	Toàn đỉnh	1,3957		1,70		99,73
2	Sườn lên ban đầu					
	Sườn lên ban đầu*	1,442	0,006	-	-	99,97
	Chen	1,42	0,10	2,0	0,3	-
3;4	-	-	-	-	-	-
5	Sườn lên ban đầu	1,276	0,049	-		99,68
	Sườn lên ban đầu*	1,250	0,036	-		99,82
	Chen	1,21	0,05	1,6	0,2	
6	Sườn lên ban đầu	1,488	0,039	-	-	99,36
	Sườn lên ban đầu*	1,556	0,022	-	-	99,80
	Chen	1,42	0,08	1,2	0,2	-
7	Sườn lên ban đầu	1,065	0,038	-	-	99,42

✎ Ghi chú: Sườn lên ban đầu* là phương pháp sườn lên ban đầu áp dụng cho một đỉnh đường cong nhiệt phát quang khi đã tách nó ra.

Đường cong nhiệt phát quang $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ được tách thành bảy đỉnh đơn bằng phương pháp giải chập với các thông số cho trong bảng 4 và có $FOM = 0,01$.

Bảng 4. Bảng tóm tắt các thông số năm đỉnh của $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ được điều chế từ phương pháp nung. Các thông số này được xác định từ phương pháp giải chập có điều kiện khi làm khớp năm đỉnh.

Đỉnh	E(eV)	$s''(s^{-1})$	b
1	1,398	$2,9 \cdot 10^6$	1,68
2	1,439	$2,0 \cdot 10^6$	1,70
3; 4	-	-	-
5	1,249	$1,9 \cdot 10^0$	1,36
6	1,548	$2,9 \cdot 10^2$	1,33
7	1,065	$9,0 \cdot 10^6$	2,00



Hình 7. Đường cong nhiệt phát quang tích phân của vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp nung khi đã làm khớp có điều kiện với bảy đỉnh. Đường liền nét là đường làm khớp, đường đứt nét là các đỉnh làm khớp, các chấm tròn là các số liệu thực nghiệm.

III. BÀN LUẬN

Xây dựng quy trình công nghệ điều chế vật liệu nhiệt phát quang $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ ở dạng bột bằng phương pháp tái kết tinh và phương pháp nung.

Chúng tôi nhận thấy rằng đường TL tích phân trong cả hai phương pháp đều có chung ba đỉnh sau: 180°C, 220°C và 300°C. Đặc biệt, đỉnh 220°C có cường độ không nhỏ đối với các đỉnh còn lại trong cả hai phương pháp điều chế. Tuy nhiên, vì có sự chồng chập của các đỉnh trong đường TL của $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp tái kết tinh cũng như sự chồng chập của hai đỉnh 180°C và 220°C trong đường TL của $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế bằng phương pháp nung nên không thể tách riêng các đỉnh này bằng phương pháp xóa nhiệt để phân tích chi tiết; và chúng tôi vẫn đang tìm cách tiếp cận các đỉnh này để làm rõ.

Bằng phương pháp giải chập kết hợp cùng các phương pháp phụ trợ khác, đã xác định được các thông số của năm trong bảy đỉnh của vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế từ phương pháp nung. Trong đó, các đỉnh có năng lượng kích hoạt trong khoảng từ 1eV đến 1,5eV; phù hợp với khoảng năng lượng kích hoạt mà Numan Salah và P. D. Sahare^[6] đã báo cáo. Bên cạnh đó, việc làm khớp giữa lý thuyết và thực nghiệm cho kết quả $FOM=1\%$ đối với vật liệu $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ điều chế từ phương pháp nung, trị số FOM cho thấy sự phù hợp giữa kết quả thực nghiệm và đường cong làm khớp từ lý thuyết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

Trương Quang Nghĩa (2004), *Giáo trình nhiệt phát quang và ứng dụng*, Trường Đại Học Khoa học tự nhiên TP. Hồ Chí Minh, tr 1, 18-21.

Trương Quang Nghĩa (2007), *Các phương pháp giải chập đường cong nhiệt phát quang*, Trường Đại Học Khoa học tự nhiên TP. Hồ Chí Minh.

Tiếng Anh

G. Kitis, J. M. Gomez-Ros and J. W. N. Tuyn (1998), *Thermoluminescence glow-curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics*, Printed in the UK.

M. Martini and F. Meinardi (1997), *Thermally stimulated luminescence: new perspectives in the study of defects in solids*. La Rivista del Nuovo Cimento, pp 3.

Mihkel Kerikmäe (2004), *Some luminescent materials for dosimetric applications and physical research*, Department of Chemistry, University of Tartu, Estonia.

Numan Salah, P. D. Sahare (2006), *The influence of high energy⁷ Li ions on the TL response and glow curve structure of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$* .

S. W. S. McKeever (1985), *Thermoluminescence of solid*, Cambridge University Press, pp. 1, 66-70.