

تأثیر ناخالصی Ce بر ویژگی‌های گرمایی نانوفسفر SrZrO_3

INC29-1356

سیده معصومه موسوی مهماندوستی*، مر جانه جعفری فشارکی، محمدرضا جلالی

گروه فیزیک، دانشگاه، پیام نور، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران-ایران

چکیده:

در این پژوهش نانو فسفر $\text{SrZrO}_3:\text{xCe}^3$ ($\text{x}=0,0.003$) به روش سل-ژل خوداحتراقی با سوخت اسید سیتریک در دمای 350°C تهیه شد. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد دمای بهینه جهت تشکیل نمونه تک فاز نانو فسفر $\text{SrZrO}_3:\text{xCe}^3$ با ساختار بلوری پروسکایت 900°C می‌باشد. اندازه بلورک‌ها برای قله مشهود (0.02) با استفاده از فرمول شرر، 33 nm برآورد شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) انجام شد. جهت بررسی آنالیز کمی از میزان عناصر موجود از آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDAX) متصل به دستگاه SEM استفاده شد. به منظور بررسی خواص ترمولومینسانس (TL)، ابتدا نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای 400°C حرارت‌دهی شد و سپس در بازه زمانی ۱ تا ۹ min با پرتو ایکس پرتو دهی شدند. منحنی ترمولومینسانس به ترتیب شامل یک قله منفرد و دو قله مجزا برای نانوفسفرهای $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ و SrZrO_3 بود.

کلیدواژه‌ها: گرمایی، نانوفسفر، SrZrO_3 .

The Effect of Ce Impurity on the Thermoluminescence Properties of SrZrO_3 Nanophosphor

S. M. Moosavi Mehmandosti*, M. Jafari Fesharaki, M. R. Jalali

Department of Physics, Payame Noor University, P.O.BOX: 19395-3697, Tehran, Iran.

Abstract:

In this study, $\text{SrZrO}_3:\text{xCe}^{3+}$ ($\text{x}=0,0.003$) nanophosphor was synthesized by self-combustion method with citric acid as fuel at 350°C . The results of x-ray diffraction (XRD) indicated the optimum temperature to form a single-phase of $\text{SrZrO}_3:\text{xCe}^3$ nanophosphor with perovskite crystal structure was 900°C . The crystals size for the apparent peak (002) was estimated to be 33 nm using Scherer formula. Surface morphology of the samples were characterized by field emission electron microscopy (FE-SEM). In order to evaluate the quantitative analysis of available elements of the x-ray energy separation analysis (EDAX) connected to the SEM device was used. In order to investigate the thermoluminescence (TL) properties, at first the samples were heated at 400°C for one hour and then irradiated with x-ray over a period of 1 to 9 minutes. The thermoluminescence curve included one single peak and two peaks for $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ and SrZrO_3 nanophosphors, respectively.

Keywords: Thermoluminescence, Nanophosphors, SrZrO_3

۱. مقدمه :

دسته‌ای از مواد نیم رسانا و نارسانا دارای این خاصیت هستند که در اثر پرتودهی و سپس گرمادهی، توانایی انتشار نور مرئی از خود را دارند که به این خاصیت ترمولومینسانس گفته می‌شود. بنابراین، ترمولومینسانس انتشار نور مرئی از ماده پرتودهی شده (نیمه هادی یا عایق) در اثر تحریک گرمایی می‌باشد. موادی که دارای این خاصیت می‌باشند را مواد ترمولومینسانس می‌نامند. هنگامی که این مواد پرتودهی می‌شوند، انرژی پرتو در اثر فرآیندهای فیزیکی در ماده جذب می‌شود و باعث برانگیختگی الکترون‌ها می‌گردد. الکترون‌های برانگیخته شده به ترازهایی با انرژی بالاتر منتقل می‌شوند و به دلیل ناپایداری در زمان کوتاهی به حالت پایه قبلی برمی‌گردند که در مسیر بازگشت به دام الکترون‌هایی که به واسطه ناخالصی یا نقایص ذاتی در ماده ایجاد شده‌اند، می‌افتند و تا زمانی که مجدد انرژی دریافت نکنند در دام باقی می‌مانند. بدین ترتیب می‌توان گفت پرتوی برخوردی با ماده در آن ذخیره شده و در صورتی که به وسیله‌ی گرما دوباره به ماده انرژی داده شود الکترون‌ها از دام آزاد شده و انرژی اضافی خود را با انتشار فوتون ترمولومینسانس انتشار می‌دهند. معمولاً دام‌های الکترونی در دماهای مختلف تخلیه می‌شوند. شدت فوتون‌های انتشار یافته بر حسب دما بیانگر منحنی درخشندگی ماده، ترمولومینسانس می‌باشد. سطح زیر منحنی درخشندگی متناسب با مقدار دز پرتوهایی است که به ماده برخورد کرده است. این پدیده باعث شده است تا موادی که این رفتار را از خود نشان می‌دهند به عنوان آشکارساز و یا دزیمتر پرتوهای یون‌ساز مانند پرتوهای ایکس، گاما، بتا و نوترون مورد استفاده قرار گیرند و آنها را دزیمتر ترمولومینسانس^۱ با علامت اختصاری TLD می‌نامند. دزیمتری، تعیین کمیت اساسی، یعنی انرژی جذب شده در واحد جرم جسم تحت تابش و یا به اصطلاح دز جذبی است. برهم‌کنش پرتو با ماده، در سطح مولکولی و اتمی موجب اثر قابل مشاهده‌ای می‌شود که به طور مستقیم با دز جذبی جسم تحت تابش ارتباط دارد. از این رو در هر گونه استفاده از پرتوهای یون‌ساز برای دستیابی به یک اثر، اطلاع از میزان دز جذبی لازم یک پیش نیاز به شمار می‌رود [۵-۱]. زیرکات‌های قلبیایی حاکی عضو خانواده اکسیدها با فرمول عمومی ABO_3 هستند که A و B به ترتیب می‌توانند $B:Ti,Zr,Si,Hf$ و $A:Ca,Pb,Sr$ باشند. این ترکیبات دارای ساختار نوع پروسکایت هستند. این ساختار از هشت‌وجهی‌های BO_6 تشکیل شده‌اند که کاتیون‌های بزرگ A در حفره‌های هشت‌وجهی قرار دارند. ساختارهای پروسکایت اگر در دماهای بالا با یون‌های پذیرنده‌ی رسانای پروتونی آلائیده شوند، خواص اپتیکی بسیار جالبی از خود نشان می‌دهند [۶ و ۷]. پروسکایت‌ها در واقع گروهی از ترکیبات هم‌شکل با فرمول عمومی ABO_3 هستند که دارای ساختار مکعبی شکل می‌باشند [۷]. در پژوهش حاضر نانو فسفر $SrZrO_3$ افزوده شده با ناخالصی Ce^{3+} به روش سل-ژل خوداحتراقی با سوخت اسید سیتریک تهیه شد. بررسی ساختار بلوری و ریخت‌شناسی سطحی آن به ترتیب با آنالیز XRD و FE-SEM انجام شد. منحنی تابش ترمولومینسانس برای نمونه خالص $SrZrO_3$ و نمونه همراه با ناخالصی $Sr_{0.097}Ce_{0.003}ZrO_3$ در زمان‌های مختلف تابش اشعه X بررسی شد.

۲. روش کار :

برای تهیه ۲ گرم از نانوفسفر $SrZrO_3 \cdot xCe^{3+}$ ($x=0, 0.003$) به روش سل-ژل احتراقی، ابتدا درصد‌های وزنی مشخصی از نیترات استرانسیم $Sr(NO_3)_2$ با خلوص ۹۹٪ ساخت شرکت مرک، نیترات زیرکونیم $Zr(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ با خلوص ۹۹٪ ساخت شرکت سیگما آلدريج، نیترات سریم $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ با خلوص ۹۹٪ ساخت شرکت مرک و اسیدسیتریک $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ به‌عنوان سوخت بر اساس استوکیومتری مشخص توزین و به طور جداگانه در آب مقطر یون‌زدایی شده حل شد و به مدت ۲۰ دقیقه با همزن مغناطیسی در دمای $50^\circ C$ قرار گرفت تا محلول یکنواختی به دست آمد. برای تنظیم pH، محلول نیترات آمونیوم NH_4NO_3 قطره قطره به محلول افزوده شد تا pH محلول به ۷ رسید [۸]. محلول به مدت ۵ دقیقه داخل کوره الکتریکی در دمای $350^\circ C$ قرار گرفت تا فرایند خود احتراقی انجام شد. در پایان پودر خاکستری نرم حجیمی به دست آمد. سپس، پودر حاصل برای تشکیل فازهای نهایی و زدوده شدن کربن‌های موجود به مدت سه ساعت در دمای $900^\circ C$ داخل کوره الکتریکی برنامه‌ریزی شده قرار گرفت. بررسی ساختاری و تشکیل فاز

¹ Thermoluminssence dosimeter

نمونه‌ها توسط الگوی پراش پرتو ایکس XRD با پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ انجام شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی FE-SEM انجام شد. آنالیز عنصری نمونه‌ها نیز با طیف‌سنج تفکیک انرژی پرتو ایکس EDAX انجام شد. خواص ترمولومینسانس نمونه‌ها پس از پرتودهی با اشعه X، با استفاده از دستگاه TLD-reader مدل Xj 10-60N ساخت شرکت ASEWARE با نرخ حرارت‌دهی 5°C/s بررسی شد.

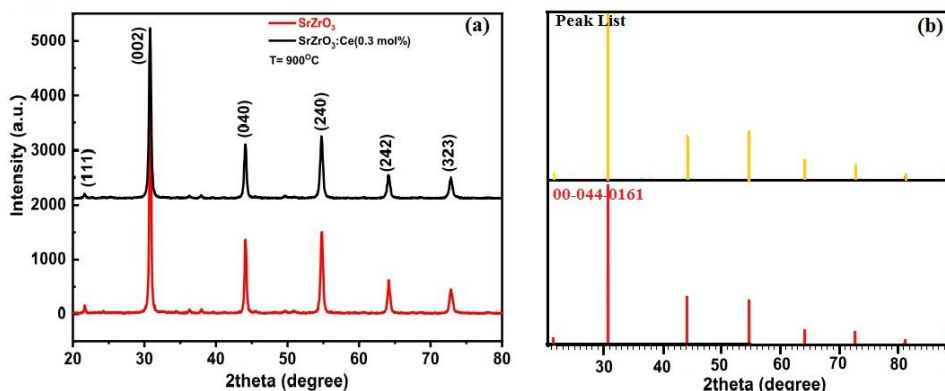
۳. بحث و نتایج:

۳.۱ بررسی ساختاری و ریخت‌شناسی:

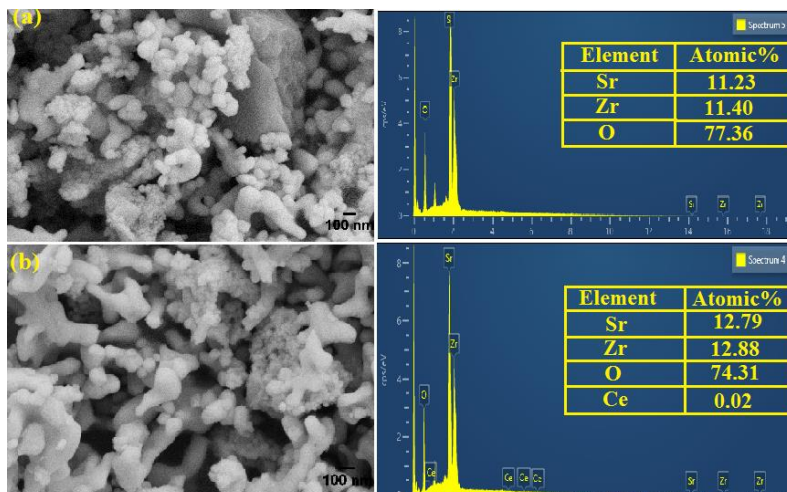
شکل ۱ (a)، الگوی XRD مقایسه‌ای نمونه SrZrO_3 و $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ کلسینه شده در دمای 900°C را نشان می‌دهد. از آنجایی که شعاع یونی Ce^{3+} 0.095 nm است که قابل قیاس با شعاع یونی Sr^{2+} 0.11 nm است و شعاع یونی Zr^{4+} 0.072 nm است، لذا Ce^{3+} جایگزین Sr^{2+} می‌شود. قله‌های مشخص شده متناظر با ساختار پروسکایت اورترومبیک SrZrO_3 با PDF کارت شماره ۰۴۴-۰۱۶۱ مطابق شکل ۲ (b) و گروه فضایی Pnma در دمای 900°C می‌باشد. هیچ گونه پیک اضافی که دلالت بر وجود فازهای اضافی در ترکیب باشد در الگوی XRD مشاهده نشده‌است. اندازه بلورک‌ها نیز با استفاده از فرمول شرر [۹]:

$$(1) \quad D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

محاسبه شده است که در آن λ طول موج اشعه ایکس (0.154 nm)، β (FWHM) پهنا در نصف بیشینه و θ زاویه پراش می‌باشد که با استفاده از داده‌های XRD قابل محاسبه است. متوسط اندازه بلورک‌ها برای قله مشهود (۰۰۲) با استفاده از فرمول شرر برای نمونه SrZrO_3 33 nm به دست آمد. ریخت‌شناسی سطحی نمونه‌ها نیز با استفاده از FE-SEM انجام شده‌است که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این تصویر متوسط اندازه ذرات با نتایج به دست آمده از نمودار XRD در توافق است و نانو ذرات از همگنی مناسبی برخوردار است. البته همان طور که در شکل هم مشهود است ذرات آلوده شده‌اند که معمولاً در روش خوداحتراقی امری بدیهی است. همان طور که در شکل ۲ هم مشهود است تصویر EDAX نمونه SrZrO_3 و $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ به ترتیب حاکی از ترکیبات Sr، Zr، O و Ce می‌باشد.



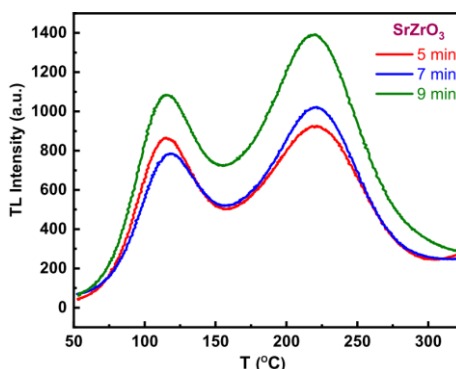
شکل ۱. (a) الگوی XRD مقایسه‌ای نمونه SrZrO_3 و $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ کلسینه شده در دمای 900°C و (b) خطوط پراش مربوط به نمونه SrZrO_3 و کارت مرجع ۰۴۴-۰۱۶۱.



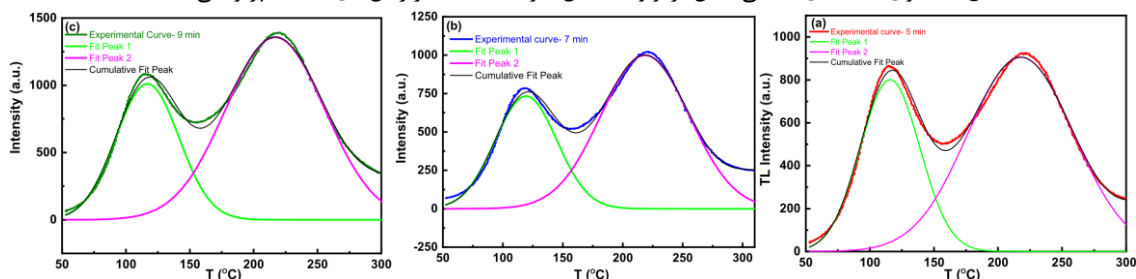
شکل ۲. تصویر FE-SEM و نمودار EDAX: نمونه (a) SrZrO_3 و نمونه (b) $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ کلسینه شده در دمای 900°C .

۲.۳ بررسی تابش ترمولومینسانس تحت پرتودهی اشعه ایکس

شکل ۳ منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه خالص SrZrO_3 را برای زمان‌های مختلف پرتودهی اشعه X (۵ تا ۹ min) با نرخ حرارت‌دهی 5°C/s نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه SrZrO_3 به ترتیب دو قله در دماهای 115°C و 219°C نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری پارامترهای سینتیک با استفاده از روش شکل پیک، منحنی ترمولومینسانس نمونه SrZrO_3 با استفاده از نرم افزار origin تفکیک شد که برای زمان‌های ۵ min تا ۹ min پرتودهی به ترتیب در شکل ۴ (c-a) نشان داده شده است. پارامترهای سینتیک اندازه‌گیری شده در جدول ۱ گردآوری شده است.



شکل ۳. الگوی مقایسه‌ای منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه SrZrO_3 در زمان‌های مختلف پرتودهی اشعه X.



شکل ۴. منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه SrZrO_3 در زمان‌های (a) ۵ min، (b) ۷ min و (c) ۹ min پرتودهی اشعه X.

روش‌های مختلفی برای تحلیل منحنی‌های ترمولومینسانس وجود دارد که روش شکل پیک یکی از متداول‌ترین این روش‌ها می‌باشد. در اینجا با استفاده از روش شکل پیک به بررسی منحنی ترمولومینسانس و محاسبه پارامترهای سینتیک مانند: فاکتور فرکانس s ، انرژی فعال سازی $E(\text{eV})$ ، مرتبه سینتیک b و فاکتور تقارن μ_g با استفاده از روابط زیر می‌پردازیم. این پارامترها با استفاده از روابط زیر [۱۰] به دست می‌آید.

$$\tau = T_M - T_1 \quad (2)$$

$$\omega = T_2 - T_1 \quad (3)$$

$$\delta = T_2 - T_M \quad (4)$$

$$\mu_g = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

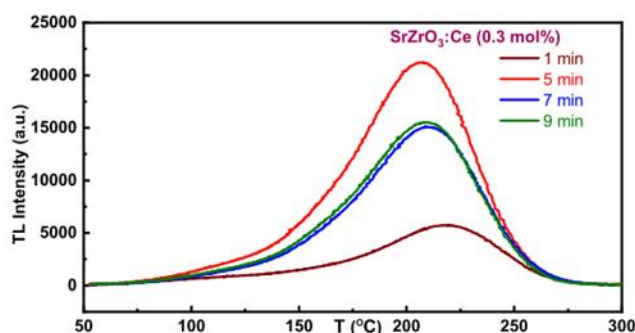
$$E = 2KT_M(1.76 \frac{T_M}{\omega} - 1) \quad (6)$$

$$s = \frac{\beta E}{KT_M^2} \cdot \frac{1}{1 + (b-1) \frac{2KT_M}{E}} \cdot \exp \frac{E}{KT_M} \quad (7)$$

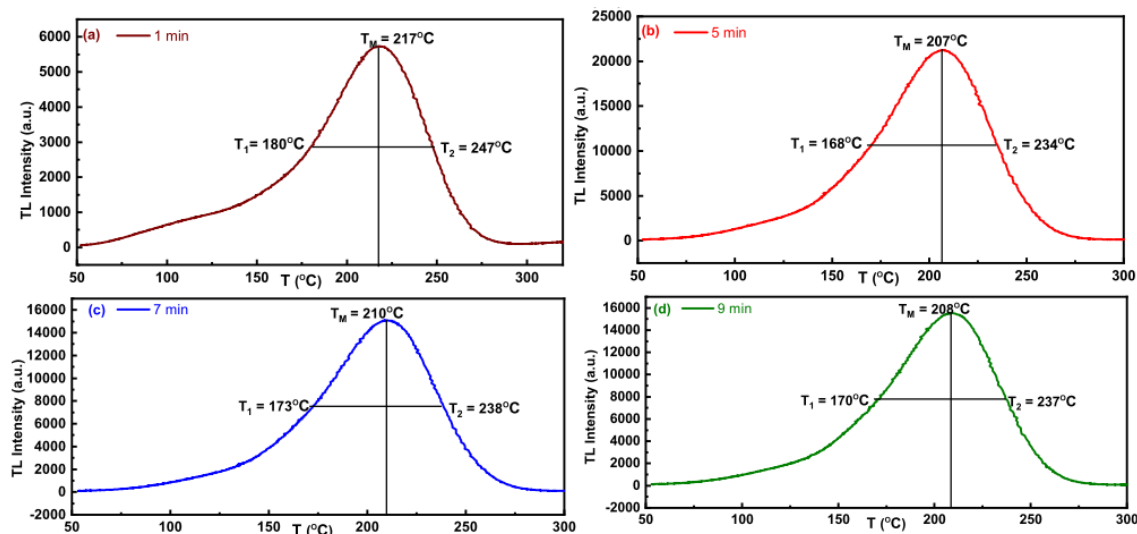
در اینجا K ثابت بولتزمن، β نرخ حرارت‌دهی ($^{\circ}\text{C/s}$) و T_M دمای بیشینه است. مرتبه سینتیک با استفاده از مقادیر μ_g برآورد می‌شود. $\mu_g = (0.0 - 39/42)$ برای مرتبه اول ($b=1$)، $\mu_g = (0.42 - 0/48)$ برای مرتبه عام و $\mu_g = (0.0 - 49/52)$ برای مرتبه دوم ($b=2$). انرژی فعال‌سازی مقدار انرژی لازم برای خالی کردن الکترون‌های به دام افتاده از مراکز گیراندازی است و مقدار آن برای مراکز گیراندازی عمیق بالا و برای مراکز گیراندازی سطحی پایین است [۱۱].

جدول ۱. پارامترهای سینتیک اندازه‌گیری شده برای نمونه SrZrO_3 .

زمان	قله	$T_1(\text{K})$	$T_m(\text{K})$	$T_2(\text{K})$	μ_g	b	$E(\text{eV})$	S^{-1}
5 min	۱	۳۶۱	۳۸۸	۴۱۵	۰/۵	۲	۰/۷۷	$1/96 \times 10^{11}$
	۲	۴۴۲	۴۹۰	۵۳۹	۰/۵	۲	۰/۶۶	$4/64 \times 10^7$
۷ min	۱	۳۶۳	۳۹۲	۴۲۱	۰/۵	۲	۰/۷۳	$3/40 \times 10^{10}$
	۲	۴۴۸	۴۹۲	۵۳۴	۰/۴۹	۲	۰/۷۶	$5/56 \times 10^8$
۹ min	۱	۳۶۱	۳۸۹	۴۱۸	۰/۵	۲	۰/۷۳	$4/43 \times 10^{10}$
	۲	۴۴۳	۴۹۰	۵۳۶	۰/۴۹	۲	۰/۶۶	$4/64 \times 10^7$



شکل ۵. الگوی مقایسه‌ای منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در زمان‌های مختلف پرتودهی اشعه X.



شکل ۶. منحنی تابش ترمولومینسانس در $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در (a) ۱ min، (b) ۵ min، (c) ۷ min و (d) ۹ min پرتودهی اشعه X.

جدول ۲. پارامترهای سینتیک اندازه‌گیری شده برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.002}\text{ZrO}_3$

زمان	$T_1(\text{K})$	$T_m(\text{K})$	$T_2(\text{K})$	μg	b	E(eV)	S^{-1}
۱ min	۴۵۳	۴۹۰	۵۲۰	۰/۴۴	۱	۱/۰۰۲	$۲/۷۲ \times 10^{11}$
۵ min	۴۴۱	۴۸۰	۵۰۷	۰/۴۰	۱	۰/۹۷	$۲/۰۷ \times 10^{11}$
۷ min	۴۴۶	۴۸۳	۵۱۱	۰/۴۳	۱	۱/۰۰۵	$۴/۲۶ \times 10^{11}$
۹ min	۴۴۳	۴۸۱	۵۱۰	۰/۴۳	۱	۰/۹۶	$۱/۵۳ \times 10^{11}$

مقایسه مقادیر انرژی فعال‌سازی برای دو نانوفسفر SrZrO_3 و $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در جدول ۱ و ۲، دلالت بر این دارد که با توجه به اینکه گستره انرژی فعال‌سازی برای نمونه SrZrO_3 از ۰/۷۷ eV - ۰/۶۶ eV و برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ از ۰/۹۶ - ۱/۰۰۵ eV است، لذا با توجه به بالاتر بودن مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، مراکز گیراندازی عمیق هستند در حالیکه پایین بودن مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نمونه SrZrO_3 ، نیز دلالت بر سطحی بودن مراکز گیراندازی دارد. همچنین با توجه به مقادیر μg در جدول، نمونه SrZrO_3 سینتیک مرتبه یک در حالی که نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ سینتیک مرتبه دو می‌باشد. رفتار ترمولومینسانس نانوذرات بسیار گسترده و متنوع و معمولاً متفاوت از نمونه‌های توده‌ای آنها می‌باشد. معمولاً با حضور ناخالصی شاهد ظاهر شدن قله‌ها در دماهای پایین‌تر و کم‌تر شدن تعداد قله‌ها هستیم اما در بعضی موارد با کوچک شدن اندازه ذرات تعداد قله‌ها افزایش می‌یابد. منحنی تابش ترمولومینسانس در شکل ۳ نشان می‌دهد نمونه SrZrO_3 بدون ناخالصی هم خواص ترمولومینسانس نشان می‌دهد و با افزایش زمان پرتودهی از ۵ تا ۹ دقیقه شدت ترمولومینسانس افزایش می‌یابد، در حالی که برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، از ۱ تا ۵ min شدت ترمولومینسانس روند افزایشی و پس از آن روند کاهشی دارد.

۵. نتیجه‌گیری:

در این پژوهش نانو فسفر SrZrO_3 با افزودنی Ce^{3+} به روش خوداحتراقی در دمای 900°C ساخته شد. الگوهای XRD نشان داد نمونه در دمای 900°C کاملاً تک فاز می‌باشد. مطالعه ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از FE-SEM و EDXS نیز حاکی از سائز نانومتری نمونه‌ها و حضور ترکیبات مورد نظر در نمونه بود. نانو فسفر $\text{Ce}:\text{SrZrO}_3$ در زمان‌های مختلف با پرتو X پرتودهی شد. مقایسه مقادیر انرژی فعال‌سازی نشان داد برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Ce}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، مراکز

گیراندازی عمیق هستند در حالیکه پایین بودن مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نمونه Sr ZrO_3 دلالت بر سطحی بودن مراکز گیراندازی دارد.

۶. مراجع:

1. J. J. Bos, Thermoluminescence as a research tool to investigate luminescence mechanisms. *Materials*, 10 (2017) 1357.
2. P. Olko, Advantages and disadvantages of luminescence dosimetry. *Radiation Measurements*, 45 (2010) 506.
3. N. Tiwari, R.K. Kuraria, S.R. Kuraria and R.K. Tamrakar, Mechanoluminescence, photoluminescence and thermoluminescence studies of SrZrO_3 : Ce phosphor. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8 (2015) 68.
4. S. Katyayan and S. Agrawa, $\text{CaSiO}_3\text{:Eu}^{2+}$, Er^{3+} , $\text{BaSiO}_3\text{:Eu}^{2+}$, Er^{3+} and $\text{SrSiO}_3\text{:Eu}^{2+}$, Er^{3+} phosphors: molten salt synthesis, optical and thermal studies. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31 (2020) 1.
5. S. K. Gupta, M. Mohapatra, V. Natarajan and S. V. Godbole, Site-specific luminescence of Eu^{3+} in gel-combustion-derived strontium zirconate perovskite nanophosphors. *J. Material Science*, 47 (2012) 3504.
6. Sh. Katyayan and S. Agrawa, Investigation of spectral properties of Eu^{3+} and Tb^{3+} doped strontium zirconium trioxide orthorhombic perovskite for optical and sensing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (2017) 18442.
7. S. Tripathi, R. Tiwari, A. K. Shrivastava, V.K. Singh, N. Dubey and V. Dubey, A review reports on rare earth activated AZrO_3 (A = Ba, Ca, Sr) phosphors for display and sensing applications. *Optik*, 157 (2018) 365.
8. B. Evangeline and P. Abdol Azeem, Temperature optimization of CaZrO_3 nanophosphors by structural and photoluminescence studies. *Materials Today: Proceeding*, 3 (2016) 3901.
9. N. Tiwari, V. Dubey and R. K. Kuraria, Mechano luminescence Study of Europium Doped CaZrO_3 Phosphor. *Fluorescence*, 26 (2016) 1309.
10. C. Zheng, C. P. Teng, D. P. Yang, M. Lin, K. Y. Win, Z. Li and E. Ye, Fabrication of luminescent $\text{TiO}_2\text{:Eu}^{3+}$ and $\text{ZrO}_2\text{:Tb}^{3+}$ encapsulated PLGA microparticles for bioimaging application with enhanced biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C*, 92 (2018) 1117.
11. S. Katyayan and S. Agrawal, Thermoluminescent behavior of UV and γ rays irradiated Eu^{2+} and Er^{3+} doped silicate phosphors. *Materials Chemistry and Physics*, 2019.