

ORIGINAL ARTICLE

Investigation of Structural and Optical Properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{ZrO}_3: x\text{Eu}^{3+}$ Nanophosphors

Masoumeh Moosavi Mehmandoosti¹, Marjaneh Jafari Fesharaki^{2*}, Mohammad Reza Jalali³

1 Ph.D. Student, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2 Associate Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

3 Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Correspondence

Marjaneh Jafari Fesharaki

Email:

m.jafari.fesharaki@pnu.ac.ir

How to cite

Moosavi Mehmandoosti, M. Jafari Fesharaki, M. Jalali, M.R. (2025). Investigation of Structural and Optical Properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{ZrO}_3: x\text{Eu}^{3+}$ Nanophosphors, Optoelectronic, 8(1), 31-38.

ABSTRACT

In this study, $\text{SrZrO}_3:x\text{Eu}^{3+}$ ($x=0.1-0.5$ mol%) nanophosphor prepared by self-combustion sol-gel method with citric acid as fuel at 350 °C. The results of X-ray diffraction (XRD) indicated that the optimum temperature to form a single-phase of nanophosphors sample with perovskite crystal structure was 900 °C. The surface morphology of the sample characterized by field-emission electron microscopy (FE-SEM). In order to evaluate the quantitative analysis of available elements, the energy dispersive X-ray analysis (EDXA) connected to the SEM device used. To investigate the thermoluminescence (TL) properties, at first the samples heated at 500 °C for one hour and then irradiated with X-ray for different content of Eu impurity. The maximum intensity of thermoluminescence obtained for the $\text{SrZrO}_3:x\text{Eu}^{3+}$ sample with $x=0.3$ mol%. The $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ sample irradiated with X-ray over a period of 30 s to 5 min. As the irradiation time increases, the number of charge carriers increases, which results in an increase in the intensity of thermoluminescence. Linearity and reproducibility checked for this sample, which can be a suitable option for dosimetry due to the significant stability and linearity of the thermoluminescence response. Kinetic parameters such as activation energy, frequency factor, and kinetic order, also calculated for $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ dosimeter.

KEY WORDS

Structural Properties, Optical Properties, $\text{SrZrO}_3:x\text{Eu}^{3+}$, Nanophosphors.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

بررسی خواص ساختاری و اپتیکی نانوفسفر $\text{Sr}_{1-x}\text{ZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$

معصومه موسوی مهماندوستی^۱، مرجانه جعفری فشارکی^{۲*}، محمدرضا جلالی^۳

چکیده

در این پژوهش نانوفسفر $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ ($x=0.1-0.5 \text{ mol\%}$) به روش سل-ژل خوداحتراقی با سوخت اسید سیتریک در دمای 350°C تهیه شد. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که دمای بهینه جهت تشکیل نمونه تک فاز نانو فسفرها با ساختار بلوری پروسکایت 900°C است. 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 (EDXA) متصل به دستگاه SEM استفاده شد. به منظور بررسی خواص ترمولومینسانس (TL)، ابتدا نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای 500°C حرارت‌دهی شد و سپس برای مقادیر مختلف ناخالصی Eu توسط اشعه ایکس پرتو دهی شدند. بیشینه شدت ترمولومینسانس برای نمونه $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ با ناخالصی $x=0.3 \text{ mol\%}$ به دست آمد. نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در بازه‌های زمانی ۳۰ s تا ۵ min تحت پرتو دهی اشعه ایکس قرار گرفت. با افزایش زمان پرتو دهی، تعداد حامل‌های بار افزایش می‌یابد که افزایش شدت ترمولومینسانس را نتیجه می‌دهد. خطی بودن و تکرارپذیری برای این نمونه بررسی شد که با توجه به پایداری قابل توجه و خطی بودن پاسخ ترمولومینسانس، می‌تواند گزینه مناسبی برای دزیمتری باشد. پارامترهای سینتیک؛ نظیر انرژی فعال‌سازی، فاکتور فرکانس و مرتبه سینتیک نیز برای دزیمتر $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی

خواص ساختاری، اپتیکی، $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ ، نانوفسفر.

۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۳ استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

مرجانه جعفری فشارکی

رایانامه:

m.jafari.fesharaki@pnu.ac.ir

استناد به این مقاله:

معصومه موسوی مهماندوستی، مرجانه جعفری فشارکی، محمدرضا جلالی (۱۴۰۴). بررسی خواص ساختاری و اپتیکی نانوفسفر $\text{Sr}_{1-x}\text{ZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۳۱ (۱)، ۳۸-۳۱.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

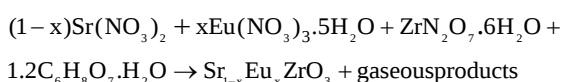
مقدمه

در دهه‌های اخیر نانو ساختارها بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. علت این انتخاب، تاثیر بالقوه آنها در بسیاری از زمینه‌ها؛ مانند الکترونیک، فوتونیک و کاتالیزورها است. زیرکات‌های قلیایی خاکی عضو خانواده اکسیدها با فرمول عمومی ABO_3 هستند که A و B به ترتیب می‌توانند $A:Ca,Pb,Sr,Ba$ و $B:Ti,Zr,Si,Hf$ باشند. این ترکیبات دارای ساختار نوع پروسکایت هستند. این ساختار از هشت وجهی‌های BO_6 تشکیل شده‌اند که کاتیون‌های بزرگ A در حفره‌های هشت وجهی قرار دارند. ساختارهای پروسکایت اگر در دماهای بالا با یون‌های پذیرندهٔ رسانای پروتونی آلائیده شوند، خواص اپتیکی بسیار جالبی از خود نشان می‌دهند. این مطالعات نشان می‌دهد که مواد ذکر شده کاربردهای بالقوه‌ای در زمینهٔ دزیمتری پرتوهای یونیزه دارند که در فسفرهای میکروبلورین معمولی این نیاز برآورده نمی‌شود. ترمولومینسانس انتشار نور مرئی از ماده پرتو دهی شده (نیمه هادی یا عایق) در اثر تحریکات گرمایی است. موادی که دارای این خاصیت هستند را مواد ترمولومینسانس می‌نامند. منحنی درخشندگی ماده ترمولومینسانس شدت فوتون‌های انتشار یافته بر حسب دما را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی درخشندگی متناسب با مقدار دز پرتوهای است که به ماده برخورد کرده است. شدت ترمولومینسانس با توجه به غلظت‌های مواد آلائیده شده به پروسکایت‌ها تغییر می‌کند. نحوهٔ به دام انداختن الکترون در این نانو فسفرها نقش مهمی را در نتایج حاصل از تابش ایفا می‌کند. اصلاح، تشخیص، ارزیابی، پایش دز فسفرها و روند به دام انداختن الکترون یک فرایند پیچیده است که عواملی مانند ویژگی‌های مواد، نوع تابش یونیزاسیون، دز و مدت زمان قرار گرفتن در معرض تابش و غیره در آن موثر است. مرتبه سینتیک و پارامترهای سینتیک حاصل از منحنی تابش ترمولومینسانس رفتار حامل‌ها در مراکز گیراندازی را نمایش می‌دهد [۷-۱]. از مهم‌ترین خصوصیات که می‌توان برای یک دزیمتر ایده‌آل در نظر گرفت عبارتند از: پایداری بالا، محوشدگی پایین، خطی بودن دزیمتر در بازه تابش و قابلیت استفاده مکرر بدون تغییر در حساسیت ترمولومینسانس است. از آنجایی که گزارشات ارائه شده از خواص اپتیکی نانوفسفر $SrZrO_3:xEu^{3+}$ بیشتر محدود به خواص فوتولومینسانس این ترکیب است و تحقیقات انجام شده در رابطه با ترمولومینسانس این ترکیب بسیار اندک است [۱۰-۷]؛ لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا توصیف جامعی از خواص ترمولومینسانس نانو فسفر $SrZrO_3$ آلائیده شده با درصد‌های مختلفی از یون Eu^{3+} تحت تابش دهی پرتو ایکس بررسی شود.

در این پژوهش نانوفسفر $SrZrO_3$ با جانشانی Eu به روش سل-ژل خوداحتراقی با سوخت اسید سیتریک تهیه شد. بررسی ساختار بلوری و ریخت‌شناسی سطحی آن به ترتیب با آنالیزهای XRD، FE-SEM و EDXA انجام شد. خواص ترمولومینسانس نانوفسفر $SrZrO_3:xEu^{3+}$ با درصد‌های مختلفی از جانشانی یون Eu^{3+} تحت تابش پرتو ایکس در بازه زمانی مختلف بررسی شد [۱۸-۸].

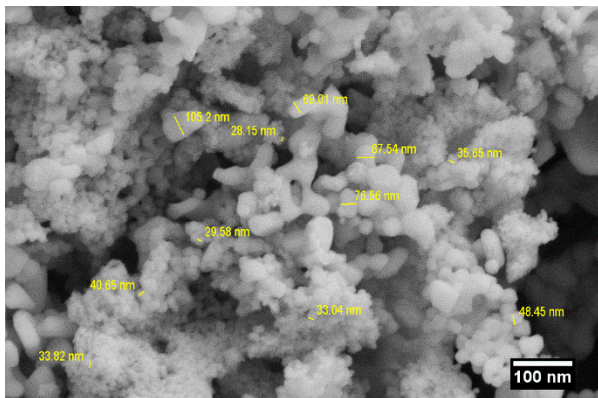
روش آزمایش

موارد مورد نیاز جهت تهیه نانوفسفر $SrZrO_3:xEu^{3+}$ عبارتند از: نیترات استرانسیوم $Sr(NO_3)_2$ (با خلوص ۹۹ درصد ساخت شرکت مرک)، نیترات زیرکونیم $ZrO(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (با خلوص ۹۹ درصد ساخت شرکت سیگما آلدريج)، نیترات یورویوم $Eu(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (با خلوص ۹۹/۹ درصد ساخت شرکت سیگما آلدريج) و اسید سیتریک $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ (با خلوص ۲۵ درصد ساخت شرکت مرک آلمان). برای تهیه دو گرم از نانوفسفر $SrZrO_3:xEu^{3+}$ مطابق استوکیومتری زیر:

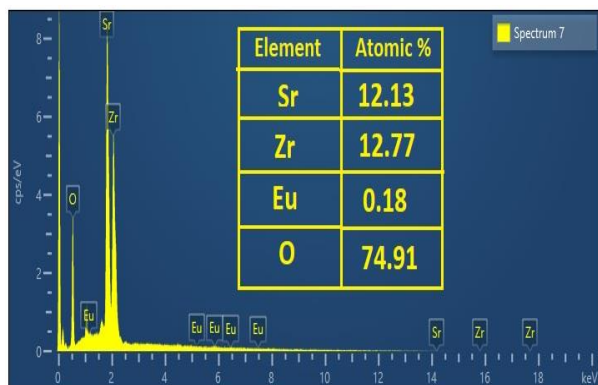


ابتدا درصد‌های وزنی مشخصی از نیترات استرانسیوم، نیترات یورویوم و اسیدسیتریک (به عنوان سوخت) توزین و به طور جداگانه در آب مقطر دو بار یون‌زدایی شده حل شد و به مدت ۲۰ دقیقه با همزن مغناطیسی در دمای $50^\circ C$ قرار گرفت تا محلول یکنواختی به دست آمد. برای تنظیم pH، محلول نیترات آمونیوم NH_4NO_3 قطره قطره به محلول اضافه شد تا pH آن به ۷ رسید [۲۳-۱۹]. محلول به مدت ۵ دقیقه داخل کوره الکتریکی در دمای $350^\circ C$ قرار گرفت تا فرایند خوداحتراقی انجام شد. در پایان پودر خاکستری نرم جیمی 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 نمونه‌ها توسط الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Philips Expert با تابش $Cu-K\alpha$ ($1/5406 \text{ \AA}$) انجام شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل-میدانی (FE-SEM) مدل models-4160 انجام شد. آنالیز عنصری نمونه‌ها نیز با طیف‌سنج تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDXA) متصل به دستگاه SEM انجام شد. بررسی خواص ترمولومینسانس روی نمونه‌های پودری به جرم 0.05 گرم با استفاده از دستگاه TLD-reader مدل TLD 7101 ساخت ایران در پروفایل دمایی $50^\circ C$ تا $400^\circ C$ با شیب دمایی $10^\circ C/s$ در یک کوره الکتریکی قابل برنامه‌ریزی انجام شد. تابش دهی نمونه‌ها با لامپ پرتو ایکس ساخت شرکت ASEWARE

ریخت‌شناسی سطحی نمونه‌ها نیز با استفاده از FE-SEM انجام شده است که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تصویر متوسط اندازه ذرات ۵۳ nm است که با نتایج به دست آمده از داده‌های XRD در توافق است و نانو ذرات از همگنی مناسبی برخوردار است. البته همان طور که در شکل ۳ هم مشهود است ذرات آگومره شده‌اند که معمولاً در روش خوداتراقی امری بدیهی است. مطابق تصویر EDXA در شکل ۴، نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ حاوی ترکیبات Sr، Zr، O و Eu است.



شکل ۳. تصویر FE-SEM نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$



شکل ۴. تصویر EDX نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$

تبدیل فوریه فروسرخ

طیف FTIR نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در شکل ۵ نشان داده شده است که وجود نداشتن واسطه‌های آلی در نمونه را تأیید می‌کند [۲۴]. همه پیک‌ها مشخصه ماده $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ است به جز پیکی که در 3493 cm^{-1} مشاهده شده است که به دلیل وجود رطوبت جذب شده در نمونه است. نوار تیزی که در 870 cm^{-1} دیده می‌شود به ارتعاشات کششی و خمشی Zr-O نسبت داده می‌شود. پیوندهایی که در محدوده 559 cm^{-1} و 1452 cm^{-1} مشاهده می‌شود؛ به دلیل ارتعاشات زیرکانات استرانسیم است. نوار ضعیف در 445 cm^{-1} به باند Sr-O نسبت داده می‌شود.

کشور چین، مدل Xj 10-60 N با طول موج پیوسته بین ۰/۵ تا ۲/۵ آنگستروم در فاصله ثابت ۵ cm از نمونه بررسی شد.

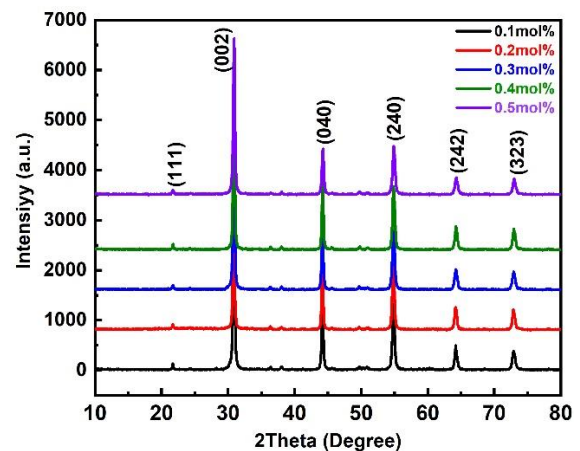
بحث و نتایج

بررسی ساختاری و ریخت‌شناسی

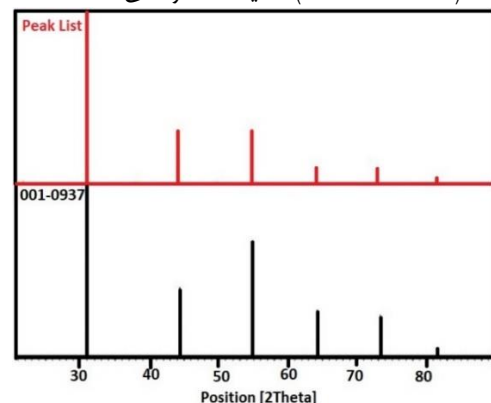
شکل ۱، الگوی XRD نمونه $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ برای مقادیر مختلف (x=0.1-0.5 mol%) کلسینه شده در دمای 900°C را نشان می‌دهد. از آنجایی که شعاع یونی Eu^{3+} ، 0.95 nm ، کوچک‌تر از شعاع یونی Sr^{2+} ، 1.1 nm است؛ لذا Eu^{3+} جایگزین Sr^{2+} می‌شود. قله‌های مشخص شده متناظر با ساختار پروسکایت مکعبی $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ با PDF کارت شماره ۰۹۳۷-۰۰۱ و گروه فضایی Pm3m در دمای 900°C است. هیچ پیک اضافی که دلالت بر وجود فازهای اضافی در ترکیب باشد، در الگوی XRD مشاهده نشده است. اندازه بلورک‌ها نیز با استفاده از فرمول شرر [۲۴، ۲۵]:

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

محاسبه شد که در آن λ طول موج اشعه ایکس (0.154 nm)، β (FWHM) پهنا در نصف بیشینه و θ زاویه پراش است. متوسط اندازه بلورک‌ها برای قله مشهود (0.02) با استفاده از فرمول شرر برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، 27 nm به دست آمد.

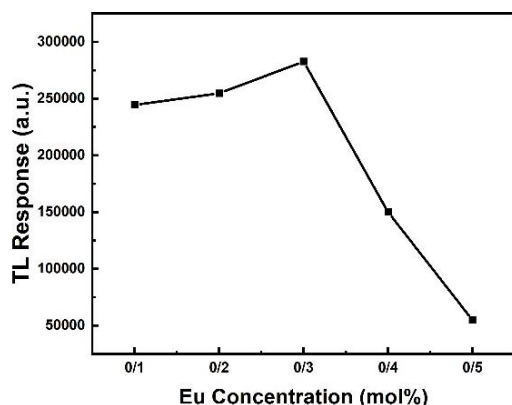


شکل ۱. الگوی XRD نمونه $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ برای مقادیر مختلف (x=0.1-0.5 mol%) کلسینه شده در دمای 900°C



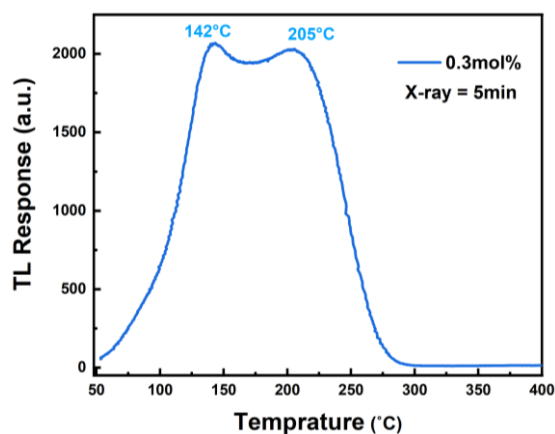
شکل ۲. خطوط پراش مربوط به نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ و کارت مرجع ۰۹۳۷-۰۰۱

است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ساختار شبکه‌ای مناسبی جهت جای‌گیری ناخالصی در نمونه به وجود آمده است.



شکل ۷. پاسخ منحنی ترمولومینسانس بر حسب مقدار Eu جانشانی شده

مطابق شکل ۷ بیشترین شدت ترمولومینسانس برای نمونه ۰/۳ mol% نمایان شده است و پس از آن با افزایش مقدار ناخالصی، شدت ترمولومینسانس روند کاهشی دارد. این ویژگی که به اثر خاموش‌شدگی^۱ معروف است، بیانگر این مطلب است که با افزایش غلظت یون لانتانید در شبکه میزبان تا غلظت آستانه موسوم به غلظت بحرانی، با افزایش شدت نور ساطع‌شده مواجه هستیم؛ پس از آن بالاتر از غلظت بحرانی، شدت ترمولومینسانس کاهش می‌یابد [۲۷].

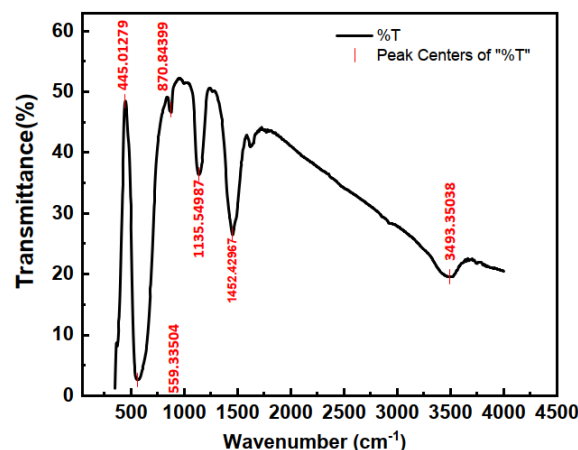


شکل ۸. منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ تحت تابش پرتو ایکس

همان طور که در شکل ۸ هم مشخص شده است، نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ با بیشینه شدت ترمولومینسانس، دارای دو قله تابشی در دماهای 142°C و 205°C است. از آن جا که این قله‌ها در بازه دمایی 100°C تا 200°C نمایان شده‌اند؛ لذا برای مشخصه ترمولومینسانس بسیار حائز اهمیت هستند. شکل ۹ منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه

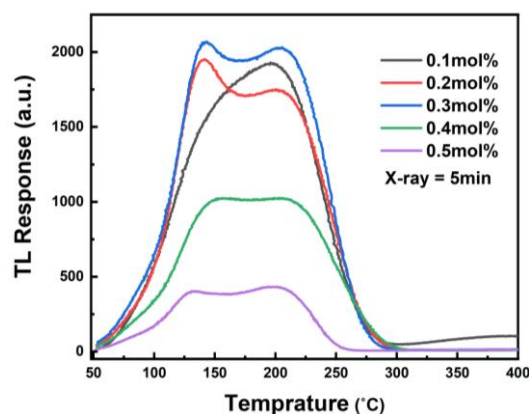
بررسی تابش ترمولومینسانس تحت تابش‌دهی پرتو ایکس

با توجه به این که حساسیت یک ماده لومینسانس قویاً به مقدار و نوع ناخالصی افزوده شده به ماده میزبان بستگی دارد، پاسخ ترمولومینسانس برای مقادیر مختلف ناخالصی Eu افزوده شده به میزبان $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ ($\text{x}=0.1-0.5 \text{ mol\%}$) بررسی شد.



شکل ۵. طیف FTIR نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$

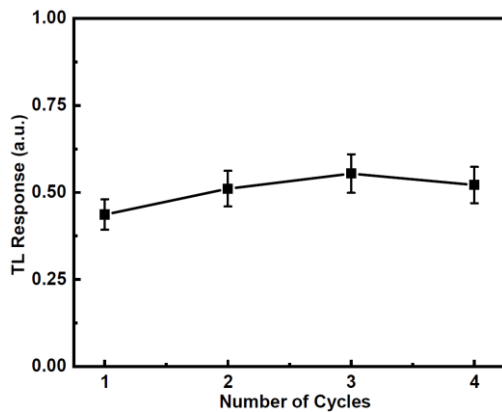
به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی خواص لومینسانس، تمامی نمونه‌ها به مدت ۱ h در دمای 500°C حرارت‌دهی شدند و پس از آن با سرعت 5°C/s سرد شدند. این دما که موسوم به دمای تابکاری است به منظور زدودن عیوب ایجادشده در نمونه با خالی کردن مراکز گیرانداز (تله‌ها)، باز ترکیب و حذف همه اطلاعات پیشین در نمونه صورت می‌گیرد. تابش‌دهی نمونه‌ها در جریان ۳۵ mA و ولتاژ ۴ kV در فاصله ۵ cm از چشمه پرتو ایکس به مدت ۵ min انجام شد و منحنی‌های ترمولومینسانس آنها با سرعت گرمایی $^\circ\text{C/s}$ ۵ از دمای اتاق تا دمای 400°C ثبت شد.



شکل ۶. منحنی تابش ترمولومینسانس $\text{SrZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ برای مقادیر مختلف Eu ($\text{x}=0.1-0.5 \text{ mol\%}$) در فاصله ۵ cm و زمان ۵ min.

همان طور که در شکل ۶ مشهود است، وجود دو قله در منحنی ترمولومینسانس برای مقادیر مختلف ناخالصی مشهود

برای بررسی خاصیت تکرارپذیری، نمونه ساخته شده با غلظت بهینه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، تابش‌دهی شد و سپس منحنی آن ثبت شد. این فرآیند چهار مرتبه انجام شد و پاسخ ترمولومینسانس آن در انتهای هر مرحله از گرمادهی، تابش‌دهی و قرائت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حساسیت نمونه نسبت به روز اول تنها ۱۶ درصد تغییر کرده است.



شکل ۱۱. تغییرات پاسخ ترمولومینسانس در استفاده مکرر از $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ دزیمر

روش‌های مختلفی برای تحلیل منحنی‌های ترمولومینسانس وجود دارد که روش شکل پیک یکی از متداول‌ترین این روش‌ها است. 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 [۲۳] می‌پردازیم.

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

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

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

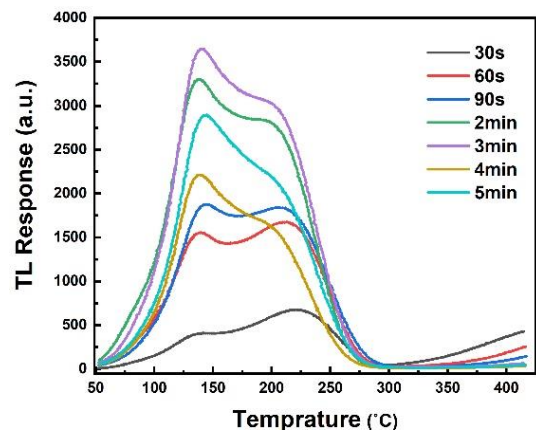
$$\mu_g = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

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

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

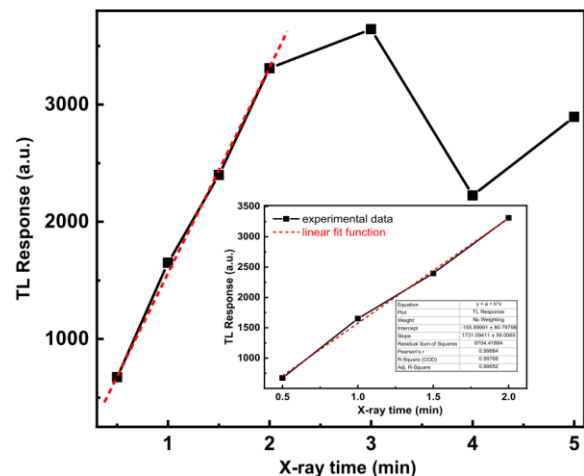
در اینجا K ثابت بولتزمن، β نرخ حرارت‌دهی ($^\circ\text{C/s}$) و T_M دمای بیشینه است. مرتبه سینتیک با استفاده از مقادیر μ_g برآورد می‌شود. $\mu_g = (0.39-0.42)$ برای مرتبه اول ($b=1$)، $\mu_g = (0.42-0.48)$ برای مرتبه دوم ($b=2$) و $\mu_g = (0.49-0.52)$ برای مرتبه سوم ($b=3$) است. انرژی فعال‌سازی مقدار انرژی لازم برای خالی کردن الکترون‌های به دام افتاده از مراکز گیراندازی

$\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ را برای زمان‌های مختلف تابش‌دهی پرتو ایکس (۳۰ s تا ۵ min) با نرخ حرارت‌دهی 5°C/s نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۹ مشهود است، با افزایش زمان تابش‌دهی از ۳۰ s تا ۳ min، شدت ترمولومینسانس روند افزایشی دارد، زیرا تعداد حامل‌های بار افزایش می‌یابد که افزایش چگالی گیراندازها (ترپ‌ها) را در پی دارد. اما پس از آن افزایش زمان تابش‌دهی (۴ min) موجب تخریب ترپ‌ها و کاهش چگالی گیراندازها می‌شود که کاهش شدت ترمولومینسانس را به دنبال دارد [۲۸]. بررسی دقیق‌تر رفتار ترمولومینسانس در بازه‌های زمانی کوچکتر (از ۳۰ s تا ۵ min) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل از زمان ۳۰ s تا ۳ min، پاسخ ترمولومینسانس به طور خطی افزایش یافته ولی پس از آن رفتار زیرخطی نشان می‌دهد که ناشی از افزایش شدت پرتو ایکس است. این رفتار مشابه کارهای گزارش شده در مرجع [۲۸] است.



شکل ۹. منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در زمان‌های مختلف پرتودهی اشعه ایکس

یکی از ویژگی‌های مهم یک دزیمر تکرارپذیری آن است. منظور از تکرارپذیری نمونه، قابلیت استفاده مجدد بدون تغییر قابل ملاحظه در ساختار منحنی، درخشش و حساسیت نمونه است.



شکل ۱۰. تغییرات شدت ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ برحسب زمان پرتودهی اشعه ایکس

جدول ۱. پارامترهای سینتیک نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$

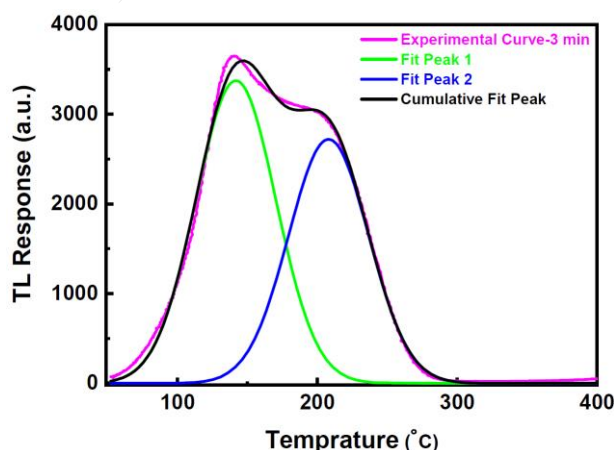
زمان	قله	$T_1(\text{K})$	$T_m(\text{K})$	$T_2(\text{K})$	μ_g	b	E(eV)	S^1
۳۰ s	۱	۳۷۷	۴۱۶	۴۵۶	۰/۴۹	۲	۰/۵۹	$4/7 \times 10^{-7}$
	۲	۴۵۸	۴۹۵	۵۲۳	۰/۴۹	۲	۰/۹۱	$3/86 \times 10^{-10}$
۶۰ s	۱	۳۷۷	۴۱۶	۴۵۵	۰/۴۹	۲	۰/۶	$2/091 \times 10^{-8}$
	۲	۴۵۷	۴۹۰	۵۲۵	۰/۵	۲	۰/۹۸	$2/643 \times 10^{-11}$
۹۰ s	۱	۳۸۳	۴۱۷	۴۵۲	۰/۵	۲	۰/۶۹	$2/571 \times 10^{-9}$
	۲	۴۵۲	۴۸۸	۵۲۵	۰/۵	۲	۰/۹	$4/408 \times 10^{-10}$
۲ min	۱	۳۷۷	۴۱۴	۴۵۲	۰/۵	۲	۰/۶۲	$5/707 \times 10^{-8}$
	۲	۴۵۱	۴۸۲	۵۱۴	۰/۴۹	۲	۱/۰۳	$7/535 \times 10^{-11}$
۳ min	۱	۳۸۱	۴۱۴	۴۴۸	۰/۵	۲	۰/۷	$2/831 \times 10^{-9}$
	۲	۴۴۶	۴۸۱	۵۱۴	۰/۴۹	۲	۰/۹۴	$8/516 \times 10^{-10}$
۵ min	۱	۳۸۱	۴۱۲	۴۴۳	۰/۵۸	۲	۰/۸۹	$1/216 \times 10^{-12}$
	۲	۴۴۰	۴۷۵	۵۰۹	۰/۵	۲	۰/۹	$4/201 \times 10^{-13}$
۵ min	۱	۳۸۴	۴۱۷	۴۵۰	۰/۴۹	۲	۰/۷۲	$6/052 \times 10^{-9}$
	۲	۴۴۷	۴۸۱	۵۱۵	۰/۵	۲	۰/۹۴	$8/516 \times 10^{-10}$

مقایسه مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نانوفسفر $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در جدول ۱ دلالت بر این دارد که با توجه به اینکه گستره انرژی فعال‌سازی برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ از ۰/۵۹-۱/۰۳ eV است؛ لذا با توجه به بالاتر بودن مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ ، مراکز گیراندازی عمیق هستند. همچنین با توجه به مقادیر μ_g در جدول، نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ سینتیک مرتبه دو هستند. رفتار ترمولومینسانس نانوذرات بسیار گسترده و متنوع و معمولاً متفاوت از نمونه‌های توده‌ای آنها است. معمولاً با حضور ناخالصی شاهد ظاهر شدن قله‌ها در دماهای پایین تر و کم‌تر شدن تعداد قله‌ها هستیم؛ اما در بعضی موارد با کوچک شدن اندازه ذرات تعداد قله‌ها افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانو فسفر SrZrO_3 با افزودنی Eu^{3+} به روش سل-ژل خوداحتراقی در دمای 900°C تهیه شد. الگوهای XRD نشان داد نمونه‌ها کاملاً تک فاز هستند. مطالعه ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از FE-SEM و EDAX نیز حاکی از سایز نانومتری نمونه‌ها و حضور ترکیبات مورد نظر در نمونه بود. بیشترین شدت ترمولومینسانس برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در ۳ دقیقه به دست آمده است. خطی بودن نمونه در بازه زمانی ۳۰ s تا ۲ min و تکرارپذیری نمونه در استفاده مکرر نشان داد که نانوفسفر $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ قابلیت استفاده در دزیمتری را دارد. بالا بودن مقادیر انرژی فعال‌سازی برای نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ همچنین نشان داد که مراکز گیراندازی عمیق هستند.

است و مقدار آن برای مراکز گیراندازی عمیق بالا و برای مراکز گیراندازی سطحی پایین است [۳-۷]. برای اندازه‌گیری پارامترهای سینتیک با استفاده از روش شکل پیک، منحنی ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ با استفاده از نرم‌افزار origin برازش شد که نحوه برازش منحنی برای min ۳ تابش‌دهی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای سینتیک اندازه‌گیری شده در جدول ۱ گردآوری شده است.



شکل ۱۲. منحنی تابش ترمولومینسانس نمونه $\text{Sr}_{0.097}\text{Eu}_{0.003}\text{ZrO}_3$ در زمان ۳ min پرتودهی اشعه ایکس

References

- [1] J. J. Bos. (2017). Thermoluminescence as a research tool to investigate luminescence mechanisms. *Materials*, 10, 1357.
- [2] Sh. Katyayan and S. Agrawa. (2017). 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, 18442.
- [3] C. Cruz-Vazquez and C. Cortez-Galaz. (2022). Beta radiation excited thermoluminescence of solid-state synthesized SrZrO_3 phosphors. *Applied Radiation and Isotopes*, 188, 110390.

منابع

- [4] Zahedifar M, Sadeghi E. (2013). Thermoluminescence dosimetry properties of new Cu Doped CaF_2 Nanoparticles. *Radiation protection dosimetry*. 157:303-309.
- [5] Salah N, Alharbi ND, Habib S, Lochab S. (2015). Thermoluminescence properties of Al_2O_3 : Tb nanoparticles irradiated by gamma rays and 85 MeV C^{6+} ion beam. *Luminescence*. 167:59-64.
- [6] Evangeline B, Abdol Azeem P. (2016). Temperature optimization of CaZrO_3 nanophosphors by structural and photoluminescence studies. *Materials Today*. 3: 3901-3907.

- [7] S. Katyayan and S. Agrawal. (2019). Optical behavior and TL kinetics of Eu^{3+} and Tb^{3+} Doped zirconate thermoluminescent phosphors. *Optical and Quantum Electronics*, 51:277
- [8] Bach, M., Schemmel, T., Hub'alkov'a, J., Bühringer, M., Jansen, H., Aneziris, C.G. (2021). Effect of thermal treatment conditions on the solid-state synthesis of barium zirconate from barium carbonate and monoclinic zirconia. *Ceram. Int.* 47, 25839–25845
- [9] Arabaci, A., Altınçekiç, T.G., Der, M., "Oksüz"omer, M.A.F. (2019). Preparation and properties of ceramic electrolytes in the Nd and Gd Co-doped ceria systems prepared by polyol method. *J. Alloys Compd.* 792, 1141–1149.
- [10] Daniel, D.J., Annalakshmi, O., Madhusoodanan, U., Ramasamy, P. (2014). Thermoluminescence characteristics and dosimetric aspects of fluoroperovskites ($\text{NaMgF}_3:\text{Eu}^{2+}$, Ce^{3+}). *J. Rare Earths* 32, 496–500
- [11] Sahu IP, Bisen DP, Tamrakar RK, Murthy K, MohapatraM. (2017). Studies on the luminescence properties of $\text{CaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$ phosphors prepared by the solid state reaction method. *Advanced Materials and Devices*. 2: 69-78.
- [12] Katyayan, S., Agrawal, S. (2018a). Facile molten salt synthesis, structural, morphological and optical studies of $\text{ASiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Er^{3+} (A = Ca, Ba, Sr) perovskites. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 29, 16609–16629
- [13] Katyayan, S., Agrawal, S. (2018b). Effect of rare earth doping on optical and spectroscopic characteristics of $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$, Tb^{3+} perovskites. *Methods Appl. Fluoresc.* 6, 035002
- [14] Katyayan, S., Agrawal, S. (2018c). Molten salt synthesis and photoluminescent studies of $\text{ATiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Yb^{2+} (A = Ca, Ba, Sr) perovskites phosphors. *J. Photonics Energy* 8(3), 036001
- [15] Katyayan, S., Agrawal, S. (2018d). Dynamics of concentration quenching in Eu^{3+} and Tb^{3+} doped calcium dioxide-oxo-zirconium perovskite. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 29(3), 2373–2383
- [16] Katyayan, S., Agrawal, S. (2019a). Thermoluminescent behavior of UV and γ rays irradiated Eu^{2+} and Er^{3+} doped silicate phosphors. *Mater. Chem. Phys.* 225(1), 384–392
- [17] Katyayan, S., Agrawal, S. (2019b). Study of TL kinetic parameters of UV and γ rays irradiated $\text{ATiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Yb^{2+} (A = Ca, Ba, Sr) phosphors. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30(11), 10660–10672
- [18] Katyayan, S., Agrawal, S. (2019c). Optical behaviour of $\text{CaSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Er^{3+} , $\text{BaSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Er^{3+} and $\text{SrSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, Er^{3+} phosphors. *JOM* 71(8), 2899–2905
- [19] Salah N, Alharbi ND, Habib S, Lochab S. (2015). Thermoluminescence properties of $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}$ nanoparticles irradiated by gamma rays and 85 MeV C^{6+} ion beam. *Luminescence*. 167:59- 64
- [20] Evangeline B, Abdol Azeem P. (2016). Temperature optimization of CaZrO_3 nanophosphors by structural and photoluminescence studies. *Materials Today*. 3: 3901-3907.
- [21] N. Tiwari, R.K. Kuraria, S.R. Kuraria and R.K. Tamrakar. (2015). Mechanoluminescence, photoluminescence and thermoluminescence studies of $\text{SrZrO}_3:\text{Ce}$ phosphor. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8. 68.
- [22] S. Das, S. Som, C. Yang, S. Chavhan & C. Lu. (2016). Structural evaluations and temperature dependent photoluminescence characterizations of Eu^{3+} activated SrZrO_3 hollow spheres for luminescence thermometry. *Scientific Reports* | 6: 25787.
- [23] C. Zheng, C. P. Teng, D. P. Yang, M. Lin, K. Y. Win, Z. Li and E. Ye. (2018). 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. 1117:1123.
- [24] S. Katyayan and S. Agrawa. (2020). $\text{CaSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$, 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. 1.
- [25] B. Evangeline and P. Abdol Azeem. (2016). Temperature optimization of CaZrO_3 nanophosphors by structural and photoluminescence studies. *Materials Today: Proceeding*, 3. 3901:3907.
- [26] N. Tiwari, V. Dubey and R. K. Kuraria. (2016). Mechano luminescence Study of Europium Doped CaZrO_3 Phosphor. *Fluorescence*, 26. 1309.
- [27] Fesharaki MJ, Jalai MR, Karimi L, Sadeghi E. (2022). Studies on the photoluminescence and thermoluminescence properties of $\text{CaZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$ phosphor for dosimetric applications. *Optical and Quantum Electronic*. 54: 1-12.
- [28] Rivera C, Bernal R, Vázquez C, García L, Córdova A. (2021). Beta particle excited thermoluminescence of CaZrO_3 phosphors synthesized by solid state reaction. *Applied Radiation Isotopes*. 168:109519-109523.