

مطالعه ویژگی‌های درخشایی گرمایی و درخشایی نوری نانوذرات آلفا آلومینا آلاینده شده با دیسپرسیوم تحت تابش گاما

مینا باقری^۱، احسان صادقی^{۱*}، و مصطفی زاهدی^{فر^۱}

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان

پست الکترونیکی: sdgh@kashanu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳)

چکیده:

هدف از این پژوهش بررسی ویژگی‌های دزسنجی فسفر ساخته شده آلومینا با ناخالصی دیسپرسیوم به عنوان یک ماده درخشایی گرمایی با حساسیت بالا و امکان دارا بودن پتانسیل لازم برای دزسنجی در دزهای بالا بوده است. ساخت نمونه‌ها به روش سل-ژل انجام شد و بیشترین حساسیت درخشایی گرمایی برای نمونه با مقدار نیم مول درصد دیسپرسیوم تحت پرتو دهی با پرتو گاما چشمه ^{60}Co ، به دست آمد. ویژگی‌های ساختاری و شکل‌شناسی ذرات به وسیله دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و عناصر موجود در نمونه آلفا آلومینا به وسیله پراش انرژی اشعه ایکس (EDS) تجزیه و تحلیل شد. پارامترهای سینتیک منحنی تابش درخشایی گرمایی نمونه ساخته شده توسط روش برازش رایانه‌ای محاسبه شدند. دو قله همپوش در دماهای ۳۹۴ و ۴۴۹ کلوین در منحنی تابش درخشایی گرمایی این نانو ذرات مشاهده شد. بررسی‌های تکمیلی بر روی منحنی تابش درخشایی گرمایی، محوشدگی و ناحیه خطی پاسخ دز، پتانسیل بالای این نانوفسفر را به عنوان یک دزسنج درخشایی گرمایی با حساسیت بالا و پاسخ خطی مناسب برای کاربردهای دزسنجی، به ویژه در دزهای بالا، نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، TL، پارامترهای سینتیک، دیسپرسیوم، منحنی تابش درخشایی گرمایی.

۱. مقدمه

پرتوها مورد بررسی قرار گیرد. بسته به نوع اشعه، آثار زیستی به جا گذاشته انرژی متفاوت است. لذا با توجه به بیماری‌های حاد ناشی از اشعه و خطرات دراز مدت آن، اندازه‌گیری صحیح مقدار دز جذب شده ناشی از این پرتوها دارای اهمیت است. از سوی دیگر، امروزه دزسنجی به روش درخشایی گرمایی^۱ به دلیل امکان پایش هم‌زمان محیط و افراد، دقت بالا و سهولت اجرا نسبت به سایر روش‌های دزسنجی، در بسیاری از کشورهای پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۴]. فرآیندهایی که منجر به گسیل درخشایی گرمایی از یک نمونه

پرتوهای یون‌ساز در زمینه‌های مختلف در مراکز پزشکی، مراکز هسته‌ای و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی کاربرد دارند. هم‌اکنون منابع گوناگون پرتوهای یون‌ساز، نظیر چشمه‌های رادیواکتیو، دستگاه‌های مولد پرتو ایکس و شتابدهنده‌های ذرات به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌های یاد شده به کار می‌روند و یکی از چالش‌های مهم پیدا کردن روشی برای تخمین صحیح مقدار دز جذب شده ناشی از این پرتوها است تا ایمنی کار با

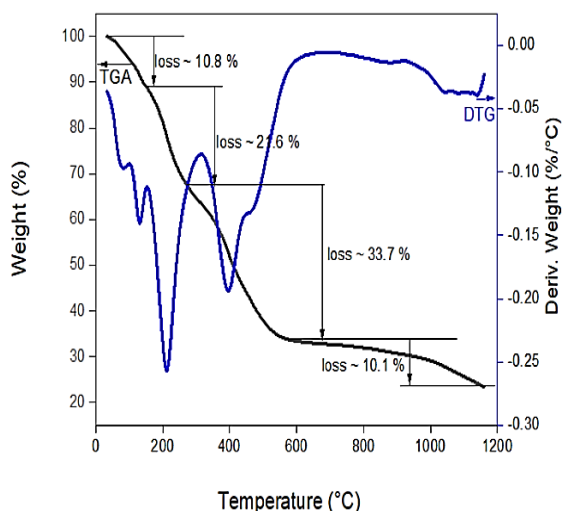
منحنی تابش درخشایی گرمایی نمونه ساخته شده به روش‌های مختلف محاسبه شد و همچنین دیگر ویژگی‌های درخشایی گرمایی آن نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲. فرایند آزمایشی

بلور آلفا آلومینا با ناخالصی دیسپرسیوم با روش سل-ژل ساخته شد. مواد اولیه استفاده شده عبارت است از آلومینیوم نیترات $Al_2(NO_3)_3$ ، دیسپرسیوم نیترات $Dy_2(NO_3)_6$ و اسید اولوئیک $(C_{18}H_{34}O_2)$ ، که همگی از شرکت مرک آلمان با خلوص بالا تهیه شدند. برای تهیه نمونه، ابتدا ۰/۲ گرم آلومینیوم نیترات با ۱۰cc آب به مدت نیم ساعت با هم‌زن مغناطیسی هم‌زده شد و سپس درصدهای مختلفی از ناخالصی‌های دیسپرسیوم نیترات به محلول اضافه شد و در ادامه اسید الوئیک اضافه شد. سپس این محلول به مدت ۳ ساعت در دمای $180^\circ C$ قرار گرفت تا آب آن کاملاً تبخیر شده و ژل سیاه رنگی تشکیل گردد. پس از آن ژل را در بوتله ریخته و برای تهیه ماده نهایی، نمونه به مدت ۲۰ دقیقه با نرخ گرمایش معین تا دمای $650^\circ C$ حرارت داده و سپس به مدت ۳ ساعت تا رسیدن به دماهای $1100^\circ C$ کلسینه شد. در نهایت رسوب شفاف و سفیدرنگی به دست آمد که همان نانوذرات آلفا آلومینا با ناخالصی دیسپرسیوم است.

به منظور بررسی ساختار و اطمینان از تشکیل نانوذرات آلفا آلومینا از یک دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Rigaku D/MAX-C استفاده شد. برای مشاهده شکل و اندازه ذرات، دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips xl-30ESE به کار گرفته شد. درخشایی نوری ذرات تولید شده به وسیله دستگاه طیف‌سنج PL مدل Perkinelmer ls55 و قوس زنون ثبت شد. در این پژوهش برای بررسی نمونه‌های پرتو دهی شده از دستگاه TLD reader مدل Harshaw ۴۵۰۰ استفاده شد و تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان با چشمه ^{60}Co پرتو دهی شدند و یک روز پس از پرتو دهی، با آهنگ دمایی $\frac{2}{5}^\circ C$ از دمای $50^\circ C$ تا دمای $250^\circ C$ قرائت و ثبت شدند.

می‌شوند، مربوط به گذار حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) بین گیراندازهای موجود در باند ممنوعه ماده جامد تحت آزمایش هستند. بنابراین، فرآیند درخشایی گرمایی را می‌توان ناشی از گذار الکترون به باند هدایت و سپس بازترکیب آن با حفره در مراکز بازترکیب دانست [۴]. مراکز گیراندازی در بلور عمدتاً بر اثر تهی‌جای‌هایی مانند مراکز F و V، ناخالصی‌های وارد شده در شبکه بلوری و یا ترکیب پیچیده‌ای از تهی‌جاها و ناخالصی‌ها (مراکز Z) ایجاد می‌شوند. هر یک از مراکز گیراندازی مذکور می‌توانند معرف قله خاصی در منحنی تابش باشند [۵]. دزسنج‌ها انواع مختلفی دارند و با توجه به کاربرد خاص هر کدام از آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶-۸]. در مورد آلومینا با ناخالصی Dy نقاط قوت و ضعف‌هایی وجود دارد که سعی شده است به دقت مورد بررسی قرار گیرند و حدود کاربرد آن‌ها با توجه به این نقاط مثبت و منفی تعیین شود. مطالعه خصوصیات دزسنجی پس از ساخت بسیار حائز اهمیت است، چرا که با مطالعه دقیق دزسنج می‌توان عمر مفید، محدوده کاربرد آن و شرایط تولید انبوه و بهینه دزسنج در طرح‌های بعدی را تعیین نمود. از طرفی مطالعه‌های اخیر نشان می‌دهند که برای دزسنجی پرتوهای یونیزه می‌توان از نانو مواد نیز استفاده کرد [۹-۱۱]. مواد در ابعاد نانو رفتار و ویژگی‌های متمایزی در مقایسه با حالت توده‌ای از خود بروز می‌دهند [۱۲]. در نانو ساختارها به دلیل کوچک بودن فضا، تابع موج الکترون و حفره به‌طور موثری با یکدیگر هم‌پوشانی دارند که باعث افزایش احتمال بازترکیب می‌شود و از طرفی با کوچک شدن اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد که منجر به افزایش حالت‌های سطحی می‌شود. هنگامی که تمرکز حالت‌های سطحی افزایش پیدا می‌کند ممکن است الکترون‌ها و حفره‌های بیشتری در نمونه تولید شود. بنابراین بازترکیب‌های فوتون‌ها و شدت درخشایی گرمایی افزایش پیدا می‌کند [۱۳-۱۴]. این دو اثر در ذراتی با اندازه کوچک‌تر بهتر دیده می‌شوند و ممکن است باعث افزایش کارایی درخشایی گرمایی نانوذرات نسبت به ساختار توده‌ای شوند [۱۵]. در این تحقیق نانوذرات آلفا آلومینای آلائیده با دیسپرسیوم به روش سل-ژل ساخته شد. پارامترهای سینتیک

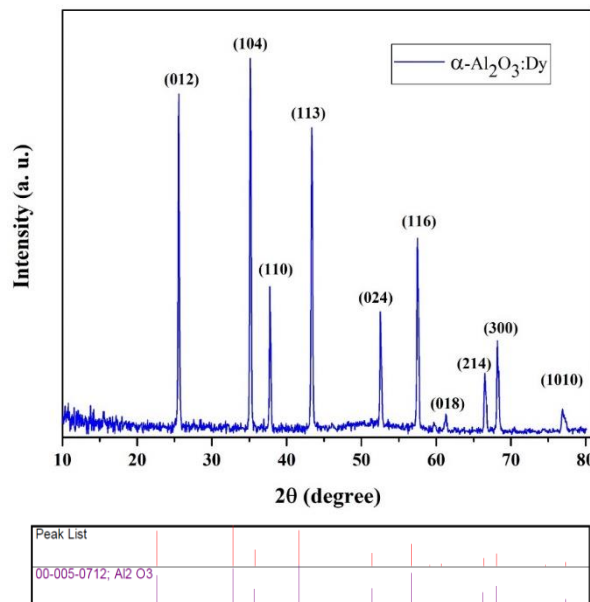


شکل ۲. منحنی TGA برای نمونه $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

نتایج TGA در شکل ۲، که از مطالعه‌ای که توسط ترینداد و همکاران [۱۹] گرفته شده است، اطلاعات بیشتری درباره تغییرات وزنی و پایداری حرارتی نمونه‌ها در دماهای مختلف ارائه می‌دهد. این اطلاعات به درک بهتر رفتار ترمودینامیکی مواد کمک می‌کند و امکان شناسایی فرآیندهای تجزیه یا تغییرات فازی را فراهم می‌آورد.

فازهای اصلی آلفا-آلومینا در بازه دمایی 540°C – 1070°C تشکیل می‌شود. علت اصلی کاهش وزن ۱۰/۱ درصدی نمونه انتقال فاز آلومینا از $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ در بازه دمایی 880°C – 930°C است. در نهایت ساختار بسیار پایدار و بلوری $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ در دمای 1060°C تشکیل می‌شود.

از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM برای بررسی ریخت‌شناسی سطوح نمونه، اندازه و شکل بلورهای ساخته شده و نحوه کنار هم قرار گرفتن آن‌ها استفاده می‌شود. شکل ۳، تصویر SEM مربوط به نانوذره آلفا آلومینا در دمای 1100°C را نشان می‌دهد. ساختار نمونه به صورت ذرات کروی با ابعاد نانومتری مشاهده می‌شود. توزیع اندازه ذرات نسبتاً یکنواخت بوده و سطح ذرات حاوی تخلخل‌هایی است. حضور ذرات یا پوشش‌هایی با شکل نامنظم در برخی نواحی، نشان‌دهنده وجود فاز دیسپرسیوم در نمونه است. این ساختار می‌تواند به دلیل روش ساخت و شرایط حرارتی اعمال شده به نمونه باشد. تخلخل موجود در سطح ذرات می‌تواند سطح ویژه نمونه را افزایش داده و بر ویژگی‌های کاتالیزوری، جذب‌کنندگی یا سایر



شکل ۱. تحلیل XRD مربوط به نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ در دمای 1100°C .

۳. بحث و نتایج

۱.۳. تجزیه و تحلیل XRD و SEM

به منظور بررسی ساختار بلوری نمونه $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ ساخته شده در دمای 1100°C از تحلیل گر XRD استفاده شد. نتیجه تحلیل در شکل ۱ قابل مشاهده است.

با توجه به این شکل قله‌هایی در زوایای (2θ) : $25/58^\circ$ ، $35/13^\circ$ ، $37/78^\circ$ ، $43/36^\circ$ ، $52/55^\circ$ ، $57/51^\circ$ ، $61/34^\circ$ ، $66/54^\circ$ ، $68/19^\circ$ ، $76/88^\circ$ که به ترتیب متناسب با شماره صفحات (012) ، (104) ، (110) ، (113) ، (024) ، (116) ، (018) ، (214) ، (300) و (1010) هستند، قابل مشاهده است و بلندترین قله در 2θ برابر $35/13^\circ$ است. این صفحات با نمونه مرجع آلومینا با شماره کارت استاندارد [۰۵-۰۰۵-۰۷۱۲] مطابقت کامل داشته که نشان دهنده ساختار آلفا آلومینا با ساختار لوزوجهی با گروه فضایی R- $3C$ است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده تک‌فاز بوده و دمای کلسینه آن 1100°C است که در مقایسه با نمونه تهیه شده با روش حالت جامد کمتر است [۱۸-۱۶]. دلیل کاهش دمای کلسینه در روش سل-ژل می‌تواند سطح ویژه بالای ژل‌های خشک شده باشد که واکنش‌پذیری بالایی را سبب می‌شوند و موجب کاهش دمای کلسینه به درجه حرارت‌های پایین‌تر می‌گردند. درحالی‌که نتایج XRD در شکل ۱ ساختار بلوری نمونه را نشان می‌دهد.

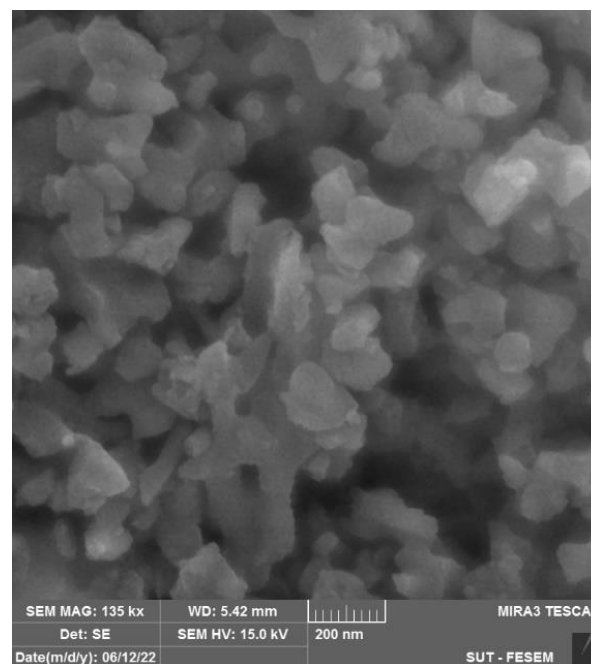
ویژگی‌های کاربردی نمونه تأثیرگذار باشد. طبق نتیجه XRD وجود ناخالصی قابل بررسی نبود، چرا که میزان ناخالصی به کار گرفته شده بسیار کم است. برای اطمینان از وجود ناخالصی در نمونه ساخته شده، تحلیل EDS از نمونه گرفته شد که نتیجه آن در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، وجود عناصر Dy، Al، و O کاملاً مشهود است و پخش شدگی بسیار یکنواخت و همگن این عناصر در تصویر کاملاً مشخص است. در جدول ۱، درصد عناصر داخل شکل قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور عناصر آلومینیوم (Al)، اکسیژن (O) و دیسپرسیوم (Dy) با ساختار $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ سازگار است. نسبت مولی این عناصر می‌تواند نشان دهنده استوکیومتری بهینه حاصل شده در طول ساخت باشد که در جدول ۱ نشان داده شده است. این موضوع می‌تواند تایید کننده روش ساخت به کار رفته در دستیابی به ترکیب مورد نظر باشد.

۲.۳. ویژگی درخشایی نوری نانوذرات آلومینا

آلفا آلومینا ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) به دلیل ساختار بلوری پایدار، مقاومت حرارتی بالا و ویژگی‌های اپتیکی مناسب، به عنوان بستری مطلوب برای آرایش با یون‌های فلزات خاکی کمیاب مانند دیسپرسیوم (Dy^{3+}) شناخته می‌شود. افزودن دیسپرسیوم باعث القای ویژگی‌های درخشایی نوری به این ماده می‌شود که برای کاربردهای اپتوالکترونیکی، لیزرهای حالت جامد و حسگرهای نوری اهمیت دارد.

طیف درخشایی نوری نشری نمونه‌های آلفا آلومینا آلاینده با Dy^{3+} معمولاً در ناحیه مرئی ظاهر می‌شود و ناشی از گذارهای الکترونی در زیرلایه $4f$ به $4f^6$ است و گذارهای نشری آن از زیرلایه‌های $f-f$ داخلی ناشی می‌شود. دمای بازپخت و شرایط حرارتی تأثیر مستقیمی بر بلورینگی و کاهش مراکز نقص در ساختار آلومینا دارند که خود موجب بهبود شدت و وضوح طیف PL می‌شود.

برای مشاهده پاسخ درخشایی نوری در ابتدا نمونه توسط یک منبع خارجی مانند لیزر یا لامپ تحریک شده و سپس توسط یک دستگاه PL طیف درخشایی نوری آن ثبت می‌شود. ایجاد پدیده درخشایی نوری نتیجه باز ترکیب الکترون‌ها در نوار هدایت و حفره‌ها در نوار ظرفیت است [۲۰ و ۲۱].

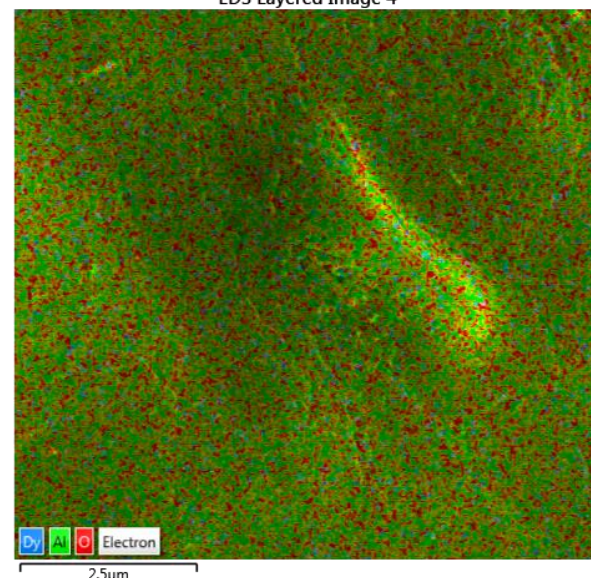


شکل ۳. تصویر SEM مربوط به نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ nm.

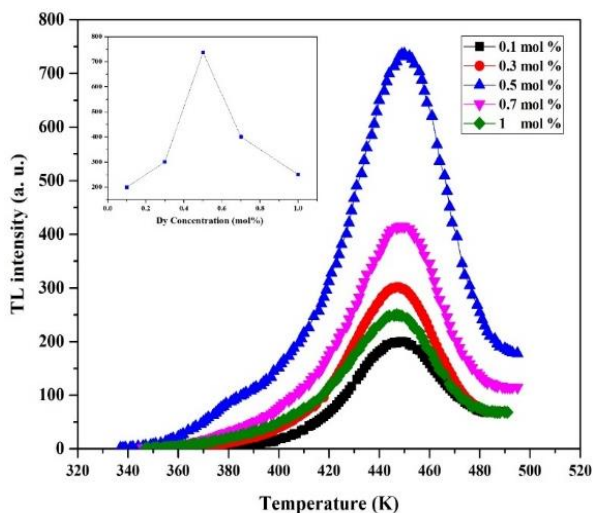
جدول ۱. نسبت مولی عناصر در تحلیل EDS برای نمونه $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$.

Etl	Line	A%	W%	Error
O	K Series	۳۹/۵۷	۵۵/۳۷	۰/۴۹
Al	K Series	۵۲/۴۶	۴۳/۵۳	۰/۵۶
Dy	L Series	۷/۹۷	۱/۱۰	۰/۸۱
Total		۱۰۰	۱۰۰	

EDS Layered Image 4



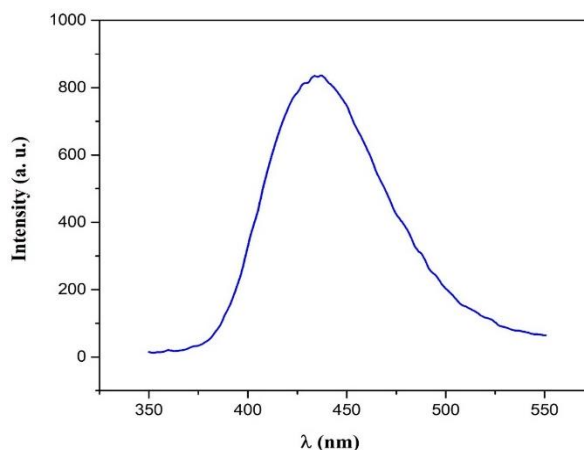
شکل ۴. طیف EDS نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ ساخته شده در دمای 1100°C .



شکل ۶. منحنی درخشش نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ در غلظت‌های مختلف ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ مول درصد از دیسپرسیوم.

درخشایی گرمایی خالی از الکترون‌های به دام افتاده باشند، انجام می‌شود [۲۱]. به عبارت دیگر، لازم است ساختار مراکز درخشایی گرمایی به وضعیتی پایدار بازگردد. به منظور دستیابی به این هدف، اعمال یک سازوکار گرمایی مشخص بر نمونه‌های درخشایی گرمایی الزامی است.

این فرآیند معمولاً برای افزایش حساسیت یک دزسنج یک یا چند ناخالصی به آن اضافه می‌گردد. لذا تعیین غلظت بهینه ناخالصی‌ها برای رسیدن به بالاترین حساسیت دزسنج ضرورت پیدا می‌کند. شکل ۶ نشان می‌دهد که چگونه در بلور $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ شدت درخشایی گرمایی ناگهان به ازای غلظت خاصی از ناخالصی Dy افت قابل توجهی می‌کند. با افزایش غلظت این آلاینده از ۰/۱ مول درصد تا ۰/۵ مول درصد، پاسخ منحنی بیش از چهار برابر شده و پس از آن، افزودن مقدار بیشتر این ناخالصی سبب می‌گردد پاسخ TL افت نماید تا جایی که در غلظت ۱ مول درصد کاهش زیادی را نشان می‌دهد. در غلظت‌های پایین، بازده درخشایی نوری با افزایش ناخالصی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیش از حد غلظت یا گستردگی نقص‌های بلوری، علاوه بر تشکیل ترازهای جایگزیده، تغییر در پهنای ناحیه ممنوعه رخ می‌دهد که منجر به کاهش گیراندازی و افت بازده درخشایی گرمایی می‌شود [۲۲]. نمونه‌ها با استفاده از چشمه ^{60}Co تا 500Gy تحت پرتودهی گاما قرار گرفتند؛ و سپس با استفاده از دستگاه TLDreader



شکل ۵. منحنی PL نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ با طول موج تحریک 300nm نانومتر.

نتایج مربوط به بررسی رفتار درخشایی نوری آلومینا با ناخالصی دیسپرسیوم در شکل ۵ آورده شده است. طول موج برانگیختگی 300nm بوده که در این تحریک، طیف گسیل پهنی در طول موج 410nm مشاهده می‌شود.

طول موج تحریک 300nm باعث می‌شود مراکز مربوط به جای خالی اکسیژن (مراکز F)، با انرژی تحریک اولیه به باند هدایت نزدیک شوند و طیف نشری حاصل از آن‌ها به دست آید. این قله مربوط به انتقالات الکترونی یون‌های دیسپرسیوم (Dy^{3+}) در ساختار بلوری $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ است که پس از جذب انرژی در ناحیه UV، نور با طول موج آبی از خود منتشر می‌کند. شدت بالای درخشایی نوری، جای‌گیری مؤثر یون Dy در زمینه آلومینا را نشان می‌دهد و می‌تواند نشان دهنده کارایی بالای این نانو ساختارها در کاربردهای اپتوالکترونیکی و حسگری باشد. همچنین طیف نشری در محدوده طول موج آبی رنگ می‌تواند وابسته به دمای کلسینه و شرایط محیطی باشد. بنابراین برای مشاهده اثر انتقال آبی در نانو ساختارها باید گاف انرژی افزایش یابد که با کاهش اندازه از میکرو به نانومتر همین اتفاق می‌افتد.

۳.۳. ویژگی‌های درخشایی گرمایی نانوذرات آلومینا

جهت کاربرد مواد درخشایی گرمایی در دزسنجی، پیش از استفاده، آماده‌سازی آن‌ها امری ضروری است. این آماده‌سازی با هدف حذف کامل اطلاعات ناشی از تابش‌های قبلی و بازگرداندن بلور به وضعیت اولیه‌ای که در آن تمامی مراکز

LiF: Mg, α -Al₂O₃:Dy دو برابر حساسیت کمتری نسبت به Ti نشان دادند. با این حال، شکل ساده منحنی تابش درخشایی گرمایی (تک قله) و همچنین دمای مناسب وقوع این قله می تواند مزیت پاسخ نمونه ساخته شده نسبت به دزسنج تجاری LiF: Mg, Ti باشد. علاوه بر این، ناحیه خطی پاسخ دز نمونه های ساخته شده گستره وسیع تری را نسبت به نمونه تجاری LiF: Mg, Ti در برمی گیرند.

۴.۳. محاسبه پارامترهای سینتیک

۴.۳.۱. روش تندی های متعدد

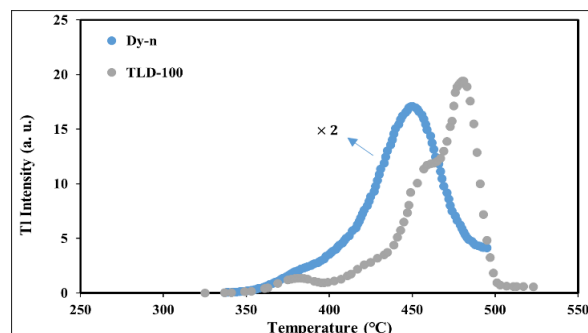
یکی از روش های معمول برای محاسبه پارامتر انرژی فعال سازی (E) در مواد درخشایی گرمایی، تحلیل تغییرات شکل منحنی درخشایی گرمایی بر اساس روش نرخ های مختلف گرمادهی است. در این روش، نمونه α -Al₂O₃:Dy با سرعت های گرمادهی مختلف (۱، ۲، ۳، ۵، و ۶ °C/s) توسط دستگاه TLDreader ثبت و منحنی های درخشایی گرمایی مربوط به آن ها رسم شدند. با افزایش سرعت گرمادهی، مکان قله اصلی منحنی به سمت دماهای بالاتر جابه جا شد، که نشان دهنده افزایش انرژی مورد نیاز برای آزادسازی الکترون های به دام افتاده در تله ها است. با استفاده از رابطه (۱) و رسم منحنی $\ln\left(\frac{T_m^*}{\beta}\right)$ بر حسب $\left(\frac{1}{T_m}\right)$ خط راستی با شیب $\left(\frac{E}{k}\right)$ به دست می آید که مقدار انرژی فعال سازی E را می توان با استفاده از آن به دست آورد [۲۳]. این نمودار در شکل ۸ در ۵۰۰ Gy برای نمونه α -Al₂O₃:Dy رسم شد و انرژی فعال سازی برای قله اصلی ۱/۰۷ eV به دست آمد.

$$\ln\left(\frac{T_m^*}{\beta}\right) = \ln\left(\frac{E}{kS}\right) + \ln\left(\frac{E}{kT_m}\right) \quad (1)$$

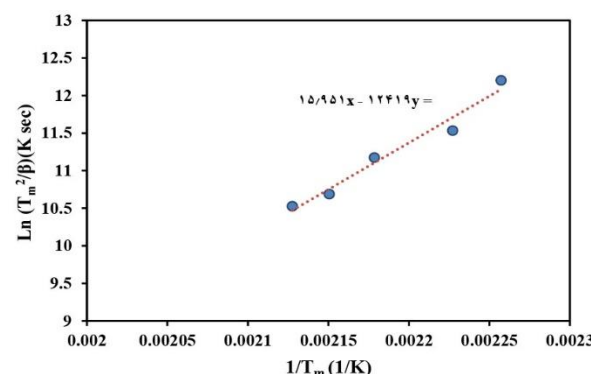
پس از تعیین انرژی فعال سازی، عامل بسامد قله اصلی نمونه α -Al₂O₃:Dy از محل تقاطع این منحنی با محور عمودی محاسبه می گردد که نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده است.

۴.۳.۲. برازش منحنی

از روش هایی که می توان در تعیین تعداد قله ها و نیز پارامترهای سینتیک منحنی درخشایی استفاده کرد، روش برازش رایانه ای بر



شکل ۷. منحنی های درخشایی گرمایی نمونه α -Al₂O₃:Dy و LiF:Mg,Ti تحت تابش گاما به میزان ۵ گری.



شکل ۸. نمودار $\ln\left(\frac{T_m^*}{\beta}\right)$ بر حسب $\left(\frac{1}{T_m}\right)$ برای قله اصلی در دز ۵۰۰ Gy برای نانوذرات α -Al₂O₃:Dy

جدول ۲. پارامترهای گیراندازی منحنی درخشایی نانوذرات α -Al₂O₃:Dy با روش تندی های متعدد.

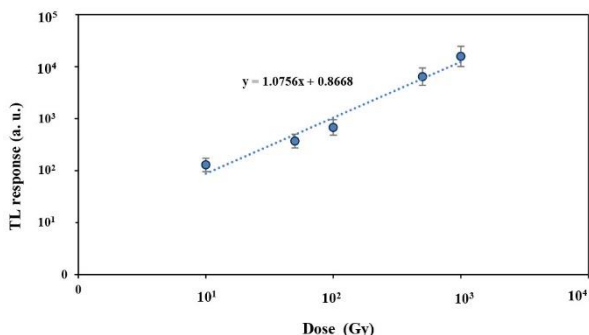
	b	E(eV)	s(1/s)
تندی های متعدد	-	۱/۰۷	۱/۱۲×۱۰ ^{۱۲}

خوانده شدند و پاسخ درخشایی گرمایی آن ها ثبت شد. بدین ترتیب بیشترین پاسخ درخشایی گرمایی در ۰/۵ مول درصد از ناخالصی دیسپرسیوم به دست آمد. این میزان ناخالصی به عنوان مقدار بهینه ناخالصی دیسپرسیوم در ادامه مراحل کار به کار گرفته شد.

۳.۳.۱. تعیین غلظت بهینه ناخالصی ها

۳.۳.۲. مقایسه با نمونه تجاری

در شکل ۷، مقایسه ای بین حساسیت های درخشایی گرمایی دزسنج تجاری LiF: Mg, Ti و نانوذرات α -Al₂O₃:Dy ساخته شده تحت تابش پرتو گاما با دز ۵ Gy ارائه شده است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نانوذرات



شکل ۱۰. پاسخ منحنی نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ بر حسب دزهای مختلف.

با استفاده از رابطه (۲) که تابعی از شدت و دمای بیشینه است، کدی در محیط C^{++} نوشته شد و برازش انجام شد [۲۶-۲۵]:

$$I(T) = I_m b^{\left(\frac{b}{b-1}\right)} \cdot S \cdot \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \times \quad (2)$$

$$\left[(b-1) \left(1 - \frac{\gamma kT}{E}\right) \left(\frac{T}{T_m}\right)^{\gamma} \cdot \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) + 1 + (b-1) \frac{\gamma kT_m}{E} \right]^{-\left(\frac{b}{b-1}\right)}$$

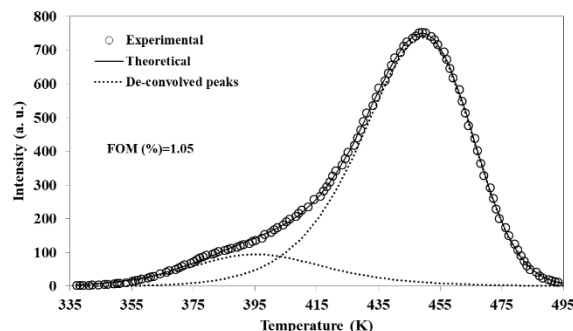
در این جا، b (مرتبۀ سینتیک) بین ۱ و ۲ است، E انرژی فعال سازی، T دما بر حسب کلون، T_m دمای بیشینه و K ثابت بولتزمن است. برای تعیین میزان انطباق منحنی درخشایی گرمایی نظری و تجربی از رابطه زیر استفاده شد:

$$FOM = \frac{\sum |y_i - f_i|}{\sum y_i} \times 100 \quad (3)$$

جدول ۳، نتایج پارامترهای سینتیک به دست آمده از برازش منحنی درخشش نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ را نشان می دهد.

۳.۴.۳. ناحیه خطی پاسخ دز درخشایی گرمایی

به دلیل پیشرفت و توسعه فناوری های تابشی، انجام مطالعات گسترده برای طراحی و توسعه آشکارسازهای درخشایی گرمایی با دز بالا، راستی آزمایی مقاومت تابشی مواد و تجهیزات، و نیز توسعه فناوری های تابشی ضروری است. بنابراین، بررسی محدوده خطی بودن پاسخ یک دزسنج درخشایی گرمایی، به ویژه در کاربردهای دزسنجی دزهای بالا، ضروری است [۲۶]. منظور از پاسخ خطی این است که با افزایش میزان انرژی جذب شده توسط نمونه، پاسخ درخشایی گرمایی آن به صورت خطی افزایش یابد.



شکل ۹. منحنی درخشایی گرمایی برازش شده نانوذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ با مقدار دز 500 Gy چشمه ^{60}Co .

اساس الگوهای سینتیکی است. روش برازش منحنی با استفاده از یک برنامه رایانه ای مبتنی بر سینتیک مرتبه عام بررسی می کند که کدام یک از معادلات نظری، برای کدام مجموعه از پارامترها، بهترین تطابق را با قله تجربی دارند [۲۴]. در این الگو پارامتری تحت عنوان مرتبه سینتیک (b) وجود دارد که به ازای سینتیک مرتبه اول برابر با ۱ و به ازای سینتیک مرتبه دوم برابر با ۲ است. الگوهای سینتیک مرتبه اول و دوم کاملاً مبنای فیزیکی دارند و از مجموعه معادلات دیفرانسیل توصیف کننده پدیده درخشایی گرمایی به ازای حالت های حدی مشخص نتیجه می شوند. اما از آنجایی که منحنی های تابش درخشایی گرمایی لزوماً منطبق با سینتیک مرتبه اول یا دوم نیستند، الگویی تحت عنوان الگوی سینتیک مرتبه عام پیشنهاد شده که در آن می توان حالت های میانی بین سینتیک مرتبه اول و دوم را مورد بررسی و برازش قرار داد. اساس روش برازش منحنی به این ترتیب است که یک سری مقادیر اولیه برای پارامترهای سینتیک همراه با داده های تجربی به برنامه داده می شود. سپس برنامه این پارامترها را تغییر داده و به سمتی می برد که بتواند قله ای را تولید کند که بهترین انطباق را با قله تجربی داشته باشد. در این روش اساساً از سه دما T_1 ، T_2 ، T_m استفاده می شود، که در آن T_m دمای شدت بیشینه قله درخشایی گرمایی، T_1 و T_2 به ترتیب دماهایی در نصف مقدار شدت بیشینه قله درخشایی گرمایی (نصف عرض قله) در سمت افزایش و در سمت کاهش منحنی هستند. برازش منحنی با استفاده از تغییر متوالی پارامترها ادامه می یابد تا زمانی که بهترین انطباق به دست آید.

در این کار، منحنی TL مربوط به نمونه های $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ با استفاده از الگوی سینتیک مرتبه عام برازش شد. برای این منظور،

۳.۴.۴. بررسی محوشدگی

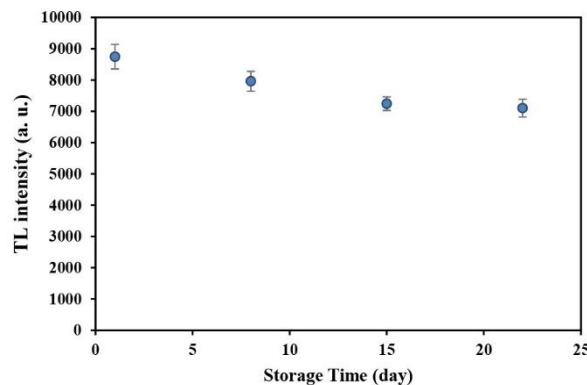
کاهش شدت TL نمونه‌های پرتو دهی شده با گذشت زمان را محوشدگی می‌گوییم [۲۸]. به عبارت دیگر با گذشت زمان تعدادی از حاملان بار به دام افتاده در دمای محیط از گیراندازهای ماده پرتو دهی شده آزاد می‌شوند. بدین جهت شدت درخشایی گرمایی قله‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بنابراین لازم است که برای هر ماده درخشایی گرمایی میزان محوشدگی محاسبه گردد [۲۹]. از آنجاکه محوشدگی موجب کاهش پاسخ درخشایی گرمایی ماده پرتو دهی شده می‌شود، مقداری از اطلاعات مربوط به لحظه پرتو دهی از بین می‌رود که این موضوع می‌تواند در مطالعات دزسنجی خطا ایجاد کند. افزایش عامل بسامد و نزدیک بودن دمای قله به دمای اتاق، باعث افزایش محوشدگی و در نهایت ناپایداری قله‌های درخشایی گرمایی می‌شود. بنابراین دمای قله منحنی درخشایی گرمایی نقش مهمی در میزان محوشدگی دارد. بدین منظور نمونه‌ها پس از پرتو دهی در شرایط یکسان با جرم یکسان (gr) ۵/۰۰۰۵) در یک محیط تاریک نگهداری شدند. منحنی تابش درخشایی گرمایی نمونه‌ها در زمان‌های ۱، ۸، ۱۵ و ۲۲ روز پس از پرتو دهی با دز ۵۰۰ Gy پرتو گاما ثبت شد. شکل ۱۱، چگونگی تغییرات پاسخ درخشایی گرمایی نمونه‌های ثبت شده را در زمان‌های مختلف بعد از پرتو دهی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از این نظر، محوشدگی نمونه‌های ساخته شده از شرایط قابل قبولی برخوردار است.

۴. نتیجه‌گیری

ما با استفاده از روش سل-ژل توانستیم دزسنجی با حساسیت مناسب برای دزسنجی سطح دز بالا بسازیم. تحلیل XRD ساختار آلفا آلومینا و تحلیل EDS صحت ساخت نانو ذرات آلفا-آلومینا با ناخالصی دیسپرسیوم را تایید می‌کنند. دزسنج آلفا آلومینا آلیاژ شده با Dy به شرایط پیچیده و گران آزمایشگاهی برای ساخت نیاز ندارد و نسبت به سایر دزسنج‌ها با توجه به شرایط ساخت آسان‌تر، مقرون به صرفه است. پارامترهای سینتیک با استفاده از هر دو روش برازش منحنی درخشش و تندی‌های متعدد اندازه‌گیری شد. طبق نتایج به دست آمده، هر دو روش

جدول ۳. پارامترهای گیراندازی منحنی درخشش نانو ذرات

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$				
peak	b	E (eV)	T_m (K)	I_m (a. u.)
۱	۲/۰	۰/۸۵	۳۹۴	۹۴/۵
۲	۱/۱	۱/۰۴	۴۴۹	۷۳۷/۳



شکل ۱۱. محوشدگی نانو ذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ در زمان‌های ۱، ۸، ۱۵ و ۲۲ پس از پرتو دهی با پرتو گاما با دز ۵۰۰ Gy و نگهداری شده در محیط تاریک.

به منظور ارزیابی ناحیه خطی پاسخ دز نمونه ساخته شده، این نمونه در شرایط یکسان (از قبیل جرم و شرایط قرائت جهت قابل مقایسه بودن نمونه‌ها) با دزهای مختلف از ۱۰ Gy تا ۱۰۰۰ Gy با استفاده از چشمه ^{60}Co تحت پرتو دهی قرار گرفت.

منحنی لگاریتمی پاسخ دز بر حسب لگاریتم دز این نمونه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. طبق این شکل، پاسخ دز نانو ذرات $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Dy}$ در محدوده ۱۰ Gy تا ۱۰۰۰ Gy به صورت خطی است.

بر اساس الگوی برهم‌کنش ردپاها می‌توان وسیع بودن ناحیه خطی پاسخ دز نانو ذرات را نسبت به نمونه‌های توده‌ای توضیح داد [۲۷]. در نانو ذرات، به دلیل ابعاد کوچک، با افزایش دز آهنگ تولید مراکز گیراندازی کاهش می‌یابد؛ زیرا بخشی از ذرات در دزهای پایین با تابش برهم‌کنش نمی‌کنند. در مقابل، در میکرو ذرات با افزایش دز، تعداد بیشتری از ردهای تابشی هم‌پوشان ایجاد می‌شود. این ردهای هم‌پوشان درخشایی گرمایی بیشتری تولید نمی‌کنند و در نتیجه، پاسخ درخشایی گرمایی به دز دریافتی در میکرو بلورها به سرعت به مقدار اشباع می‌رسد.

پتانسیل گیراندازی نسبت به قله اول بیشتر است. با افزایش میزان غلظت ناخالصی Dy، شدت درخشایی گرمایی نانوذرات ساخته شده افزایش می‌یابد و قله اصلی بلور در دماهای بالاتری قرار می‌گیرد که این موضوع می‌تواند موجب کاهش محوشدگی منحنی درخشش شود. گستره پاسخ دز خطی تا 1000 Gy ، این نانوذرات را نامزد بسیار مناسبی برای اهداف دزسنجی در سطح دز بالا می‌کند.

به کار برده شده در توافق با یکدیگر بودند. در مطالعه قله‌های دزسنجی درخشایی گرمایی نانوذرات ساخته شده با استفاده از داده‌های منحنی برازش رایانه‌ای، مقدار مرتبه سینتیک به دست آمده برای قله اول به اندازه قابل توجهی بزرگتر از واحد به دست آمد و رفتار قله دوم نزدیک به مرتبه اول مشاهده شد. بنابراین تقریب مرتبه اول برای قله دوم خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد نخواهد کرد. مقدار انرژی فعال‌سازی برای قله دوم 1.04 eV و برای قله اول 0.85 eV محاسبه شد. بنابراین در قله دوم عمق

۵. مراجع

1. A Khorshidi, *Nucle. Eng. Technol.* **56** (2024) 2790.
2. S A Sinclair, M I Pech-Canul, M C Acosta-Enríquez, R M Amavizca, A S Crist, & J Marcazzó, *Heliyon*, **10** (2024) e25025.
3. G I Efenji, S M Iskandar, N N Yusof, J A Rabba, O I Mustapha, I M Fakhirul, & A O Oke *J. Appl. Scie. Enviro. Manag* **28** (2024) 1129.
4. A Mazucco, R J Wolterbeek, V Gulino, M F Sgroi, P Ngene, P E de Jongh, & M Baricco, *RSC advances* **15** (2025) 17466.
5. S S Reddy, K R Nagabhushana, S H Tatumi, & N R Thejavathi, *J. Lumine.* **280** (2025) 121067.
6. A El-Adawy, N E Khaled, A R El-Sersy, A Hussein, & H Donya, *Appli. Radiat. . Isot.* **68** (2010) 1132.
7. M Pal, B Roy, & M Pal, *J. of Modern Phys.* **2** (2011) 1062.
8. N Ravikumar, R A Kumar, B S Panigrahi, U Madhusoodanan, C B Palan, & S K Omanwar, *Nucle. Instrum. Meth. B* **436** (2018) 203.
9. M R Jalali, *Int. J. Env. Sci. Educ.* **13** (2018) 229.
10. N Salah, *Radiat. Phys. Chem.* **80** (2011) 1.
11. M Zahedifar, & E Sadeghi, *Radiat. Phys. Chem* **81** (2012) 1856.
12. N Baig, I Kammakakam, & W Falath, *Mater. Advan.* **2** (2021) 1821.
13. B An, W Wang, G Ji, S Gan, G Gao, J Xu, & G Li, *Energy* **35** (2010) 45.
14. Y Kobayashi, Y Yasuda, & T Morita, *Adva. Mater. Process. Techno.* **7** (2021) 482.
15. M Bagheri, E Sadeghi, & M Zahedifar, *Nucle. Instrum. Meth. B* **537** (2023) 46.
16. R Rogojan, E Andronescu, C Ghitulica, & B S Vasile, *UPB Buletin Stiintific, Series B: Chem. and Mater. Scie.* **73** (2011) 67.
17. H H Mert, & M S Mert, *Thermochimica Acta* **681** (2019) 178382.
18. R Annamalai, A Upadhyaya, & D Agrawal, *Bulletin of Materials Science* **36** (2013) 447.
19. N M Trindade, M G Magalhães, M D S Nunes, E M Yoshimura, & L G Jacobsohn, *J. Luminescence* **223** (2020) 117195.
20. J M Kalita, & M L Chithambo, *J. Luminescence* **196** (2018) 195.
21. O Khatim, T H. N Nguyen, M Amamra, L Museur, A Khodan, & A Kanaev, *Acta materialia* **71** (2014) 108.
22. S Bahl, S P Lochab, & P Kumar, *Radiat. Phys. Chem* **119** (2016) 136.
23. E Habibi, M Zahedifar, & E Sadeghi, *J. Luminescence* **237** (2021) 118173.
24. M Talebi, E Sadeghi, M Zahedifar, & S Harooni, *Nucle. Instrum. Meth. B* **530** (2022) 29.
25. Z G Portakal-Uçar, M Oglakci, V Correcher, M Sonsuz, N Can, Y Z Halefoglu, & M Topaksu, *J. Luminescence* **253** (2023) 119493.
26. L C Matsushima, G RVeneziani, R K Sakuraba, J C Cruz, & L L Campos, *Appli. Radiati. Isoto.* **100** (2015) 7.
27. M J Ware, B Godin, N Singh, R Majithia, S Shamsudeen, R E Serda, & H D Summers, *ACS nano* **8** (2014) 6693.
28. S V Nikiforov, N Y Karavannova, & D V Ananchenko, *Radiat. Phys. Chem.* **238** (2025) 113172.
29. I O Polo, & L V Caldas, *In Journal of Physics: Conference Series* **1826** (2021) 012045.