

تولید بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم به روش همرسوبی و بررسی خواص ترمولومینسانس و فوتولومینسانس آن

مطهره طالبی^۱، احسان صادقی^۲ و مصطفی زاهدی^۱

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

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

پست الکترونیکی: motahare_talebi@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵)

چکیده

در این تحقیق رفتار ترمولومینسانس دزنسج کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم (KCl:Dy) مطالعه شد. به منظور بررسی ریخت‌شناسی اندازه و شکل ذرات ساخته شده از دستگاه پراکندگی پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. کلرید پتاسیم با درصد‌های مختلف ناخالصی دیسپرسیوم به روش همرسوبی ساخته شد و بهترین پاسخ ترمولومینسانس نسبت به پرتوهای گاما در ۵٪ مول درصد تعیین شد. با استفاده از برنامه شبیه‌ساز کامپیوتری مبتنی بر سینتیک مرتبه‌عام، منحنی درخشش ترمولومینسانس و پارامترهای سینتیک مربوطه محاسبه شد. منحنی درخشش ترمولومینسانس این بلور دو قله در دماهای ۳۹۳ و ۴۱۵ کلوین دارد. دیگر خواص دزنسجی از قبیل محوشدگی و ناحیه خطی پاسخ دز نیز مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: ترمولومینسانس، کلرید پتاسیم، همرسوبی، دیسپرسیوم، TLD

۱. مقدمه

ترمولومینسانس یک روش قابل اطمینان برای کاربردهای دزنسجی است. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه لومینسانس، ترمولومینسانس و خواص دزنسجی آلکالی هالیدها انجام شده و خواص ترمولومینسانس آلکالی هالیدها نشان می‌دهد که در دزنسجی پرتوهای یونساز و غیریونساز مناسب هستند. از جمله این بررسی‌ها رفتار لومینسانس و

ترمولومینسانس آلکالی هالیدها به LiCl ، NaCl ، RbCl و LiF می‌توان اشاره کرد [۱-۶]. ترمولومینسانس و فوتولومینسانس سدیم کلراید با ناخالصی Mn و Cu به روش همرسوبی و سونو شیمی انجام شد. پاسخ ترمولومینسانس و فوتولومینسانس با استفاده از روش سونو شیمی به دلیل کوچک بودن اندازه آن نتایج بهتری داشته است [۷]. ویژگی‌های دزنسجی کلرید پتاسیم با ناخالصی Ce ، Tl ، Eu مورد بررسی قرار گرفته است [۸-]

الی ۵ روز خشک شدن نمونه زمان برده است. در تحقیق مورد بحث درصد ناخالصی بهینه ۰/۱ مول درصد بوده و تک قله در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد دارد [۱۲].

در این مطالعه تولید کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم به روش همرسوبی که روش آسان و ارزانی است، انجام شد. برای ساخت در این روش حدود ۳ ساعت زمان نیاز است که در مقایسه با ساخت به روش شیمیایی مرطوب در زمان صرفه جویی می شود. همچنین به مقایسه منحنی درخشندگی کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم با نمونه تجاری ۱۰۰-TLD پرداخته ایم.

۲. مراحل آزمایش

میکرو بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم به روش همرسوبی ساخته شد. مواد اولیه استفاده شده عبارت است از پتاسیم خالص، اتانول، دی اتیل مالونات، تولوئن، استیل کلراید و دیسپرسیوم سولفات که تمامی مواد از شرکت مرک با خلوص بالا تهیه شد. برای ساخت، در ابتدا ۰/۳ گرم پتاسیم خالص در ۱۰ میلی لیتر اتانول بر روی همزن مغناطیسی به مدت ۳ ساعت قرار گرفت تا به خوبی حل شود و پس از آن دیسپرسیوم سولفات، ۲ میلی لیتر دی اتیل مالونات، ۱۰ میلی لیتر تولوئن به محلول اضافه شد و در پایان ۲/۶ میلی لیتر استیل کلراید به صورت قطره قطره اضافه شد. پس از حل کامل مواد، ترکیب شیری رنگ حاصل شد و در دستگاه ساتریفیوژ چندین مرتبه شستشو داده شد و پودر سفید رنگ به دست آمده در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت در کوره خشک شد.

به منظور بررسی ساختار و اطمینان از تشکیل بلور کلرید پتاسیم از یک دستگاه پراکندگی پرتو ایکس (XRD) مدل Rigkudmaxcdiffractometer استفاده شد. برای مشاهده شکل و اندازه ذرات، دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philipsxl-۳۰ESEM به کار گرفته شد. فوتولومینسانس ذرات تولید شده به وسیله دستگاه طیف سنج PL مدل PerkinelmerLS۵۵ و قوس زنون ثبت شد. در این پژوهش

[۱۰]. مطالعات لومینسانس تحت تابش گاما بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی Ce و مقایسه با کلرید پتاسیم خالص نشان می دهد که با کاهش میزان ناخالصی در بلور، خواص دزسنجی آن کاهش می یابد و این ممکن است به دلیل تبدیل شدن یون Ce^{3+} به Ce^{4+} باشد که به عنوان حفره گیرانداز عمل می کند [۸].

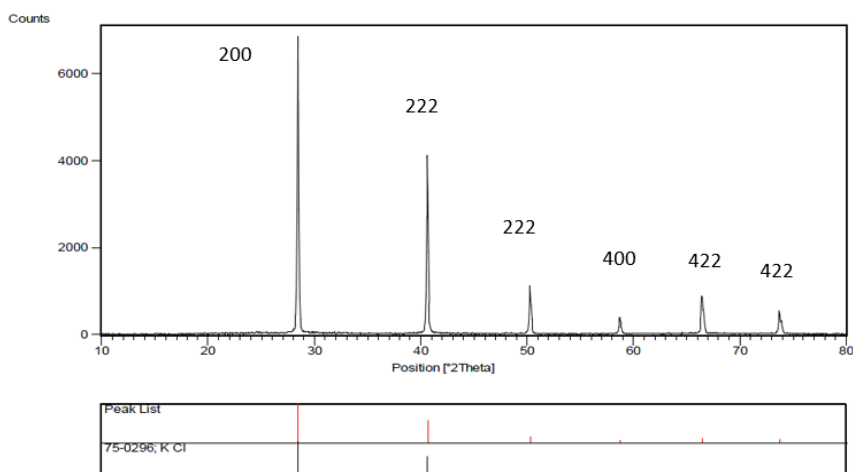
دزسنجی تحت تابش UV به دلیل کاربرد در پزشکی و صنعت بسیار مورد توجه واقع شده و در بررسی خواص ترمولومینسانس کلرید پتاسیم با ناخالصی Eu به آن اشاره شده است. در منحنی درخشش ترمولومینسانس تحت تابش اشعه UV پنج قله از دمای اتاق تا دمای ۶۷۳ کلوین گزارش شد. یک قله پهن در دمای ۶۵۰ کلوین وجود دارد که خواص ترمولومینسانس آن به صورت خطی با افزایش زمان تابش، افزایش می یابد. حساسیت این قله گرچه بالا نبوده اما پایدار است [۹].

خواص اسپکتروسکوپی، فوتولومینسانس و ترمولومینسانس بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی TL+Ca و TL نشان می دهد که KCl:TL+Ca به دلیل ازدیاد غلظت جفت (A^0+V_k) ، پاسخ ترمولومینسانس بسیار پرشدتی نسبت به KCl:TL دارد. به دلیل فرایند رنگ آمیزی الکترولیتی^۱، خواص اسپکتروسکوپی بلور کلرید پتاسیم تغییر کرده و طیف جذب و فوتولومینسانس می تواند به ویژگی های اپتیکی مربوط باشد [۱۰].

ویژگی های ترمولومینسانس و فوتولومینسانس کلرید پتاسیم با ناخالصی Tb، تحت تابش اشعه گاما با سه درصد ناخالصی ۱، ۳ و ۵ انجام شده است و از آنجایی که نتایج برای سه درصد مختلف یکسان بود، مطالعات با درصد ناخالصی ۳ درصد انجام گرفت. در آن تحقیق پس از ۳۰ دقیقه پرتو دهی گاما به نمونه ساخته شده، دو قله در دمای ۴۲۳ و ۵۱۳ کلوین مشاهده شد و همچنین مشخص شده که با افزودن ناخالصی Tb به بلور، قله دمای ۶۵۰ کلوین که در نمونه خالص وجود دارد حذف می شود [۱۱]. بوجبال در سال ۲۰۱۲ کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم را به روش شیمیایی مرطوب^۲ ساخته و به مدت ۴

۱. Electrolytic coloring

۲. Wet chemicals



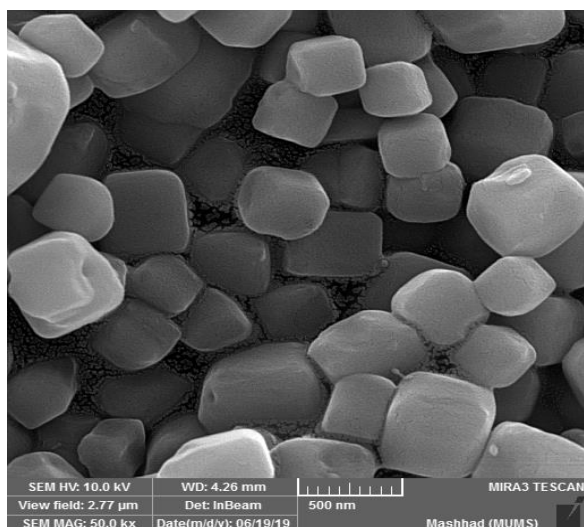
شکل ۱. تصویر XRD کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم.

برای قرائت نمونه‌های پرتودهی شده از دستگاه هارشاو TLD ردیر^۱ مدل ۴۵۰۰ استفاده شد.

نمونه ساخته شده کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم در شرایط ثابت برای انجام پرتودهی آماده شد. نمونه قبل از پرتودهی در دمای ۷۰° درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از یک کوره قابل برنامه ریزی با دقت دمایی ۱ ± درجه سانتیگراد گرمادهی شد و پس از آن بلافاصله تا دمای اتاق سرد شد.

تمامی نمونه‌های آماده‌سازی شده با چشمه^۶Co مورد پرتودهی قرار گرفتند. به دلیل آن که پاسخ ترمولومینسانس متأثر از جرم نمونه‌ها است، جرم تمام نمونه‌های ساخته شده به مقدار ۵ میلی‌گرم با یک ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱ g ثابت نگه داشته شد.

دستگاه TLD ردیربا یک نرم افزار WIN REMS راه‌اندازی می‌شود. نمونه‌ها در ظرف مخصوص در دستگاه خوانشگر جهت قرائت قرار داده شدند. نمونه‌ها با آهنگ گرمادهی ۲ °C / S از دمای ۵۰ درجه سانتیگراد تا بیشینه دمایی ۳۵۰ درجه سانتیگراد قرائت شدند، و در انتها نمودار شدت بر حسب دما ثبت شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط ثابت، در اتاق تاریک و با ساخت یکسان صورت گرفتند.

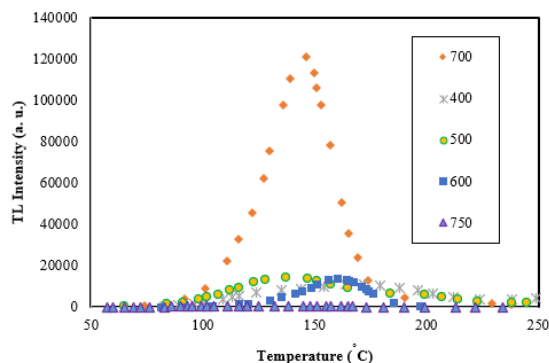


شکل ۲. تصویر SEM بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی Dy.

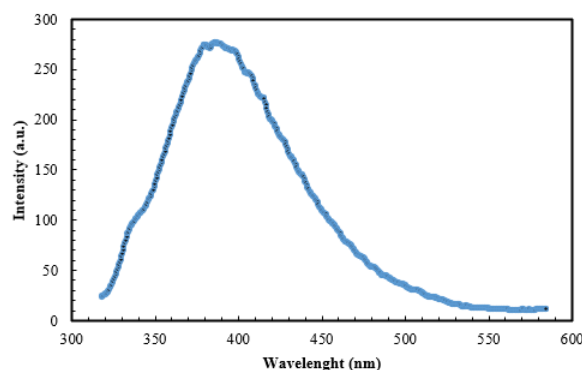
۳. نتایج و بحث‌ها

الگوی پراش پرتو ایکس به منظور حصول اطمینان از تشکیل ساختار بلوری مد نظر انجام گرفت. الگوی پراش پرتو ایکس ذرات ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. طیف مربوط به ذرات کلرید پتاسیم است که با کارت مرجع به شماره ۰۲۹۶-۷۵ مطابقت دارد و نشان دهنده تولید بلور کلرید پتاسیم به شکل مکعبی است. تصویر SEM نمونه‌های ساخته شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که ساختار بلور مورد نظر یکنواخت و همگن و در ابعاد میکرو است.

۱. Harshaw TLD Redear



شکل ۴. منحنی گرمادهی ذرات کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم با دماهای مختلف، به منظور تعیین بهترین رژیم حرارتی برای تفت دادن نمونه ساخته شده.



شکل ۳. طیف فوتولومینسانس ذرات کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم.

آمد. این ترکیب دما و زمان به منظور بازپخت نمونه‌ها در به کارگیری مجدد استفاده شد.

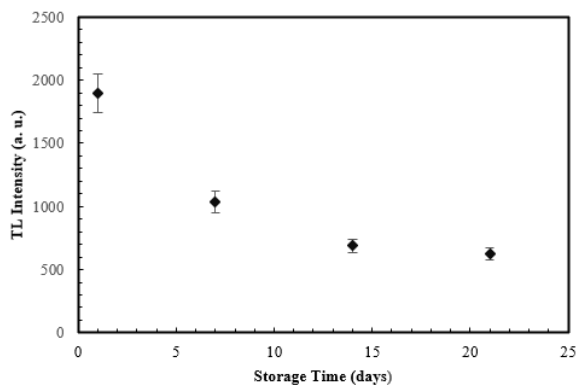
میزان ناخالصی به کار رفته در ساخت بلور تأثیر بسیار بر پاسخ دزسنج دارد، به این منظور برای به دست آوردن میزان بهینه ناخالصی، نمونه با مقادیر مختلف ناخالصی با ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ مول درصد آماده‌سازی شد و مراحل گرمادهی با دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، پرتودهی با دز ۱۰۰ Gy و قرائت برای هر دزسنج انجام شد و بهترین پاسخ برای نمونه با مقدار ناخالصی ۰/۵ مول درصد به دست آمد. در شکل ۵ نتایج بهینه کردن ناخالصی دیسپرسیوم در بلور کلرید پتاسیم مشاهده می‌شود.

یکی از خصوصیات مهم یک دزسنج آرمانی آن است که شدت پاسخ ترمولومینسانس نمونه مورد نظر با گذشت زمان کاهش نیافته و همچنین شکل منحنی درخشندگی بدون تغییر باشد. محوشدگی ذرات کلرید پتاسیم در بازه زمانی ۲۱ روزه بررسی شد، در ابتدا نمونه در دما و زمان مناسب گرمادهی شد و تحت پرتودهی با دز ۱۰۰ Gy قرار گرفت و سپس در روزهای ۱، ۷، ۱۴ و ۲۱ پاسخ منحنی درخشندگی ثبت شد. مقایسه میزان حساسیت پاسخ ترمولومینسانس با نمونه‌های تجاری میزان کارایی آن را به اثبات می‌رساند، به این منظور نمونه ساخته شده کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم و همچنین نمونه تجاری TLD100 هر دو گرمادهی شده و در معرض چشمه ^{60}Co با دز ۱ Gy قرار گرفتند و توسط

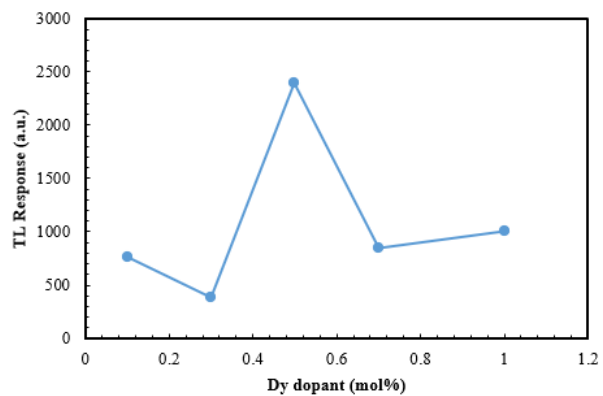
برای مشاهده پاسخ فوتولومینسانس در ابتدا ذرات توسط یک منبع خارجی مانند لیزر یا لامپ تحریک شده و سپس توسط دستگاه PL طیف فوتولومینسانس آن ثبت می‌شود. طیف برانگیختگی در طول موج ۳۰۰ نانومتر بوده که در این تحریک طیف گسیلی پهنی در طول موج ۳۸۰ نانومتر مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به بررسی رفتار فوتولومینسانس کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم در شکل ۳ آورده شد است.

ذرات ساخته شده کلرید پتاسیم به وسیله پرتوهای گاما از چشمه ^{60}Co به میزان ۱۰۰ Gy پرتودهی شدند. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی خواص دزسنجی در ابتدا فرایند تابکاری نمونه انجام می‌پذیرد. در این مرحله برای یافتن بهترین ترکیب زمان و دمای گرمادهی (به منظور تف دادن اولیه نمونه‌ها)، نمونه در دمای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد و در مدت زمان ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه گرمادهی شد و در زمان ۳۰ دقیقه و در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد بهترین نتیجه در به دست آوردن بالاترین حساسیت ترمولومینسانس تعیین شد. شکل ۴ نتایج مربوط به گرمادهی را نشان می‌دهد.

از طرفی به منظور استفاده مجدد از نمونه‌های دزسنجی ساخته شده، برای پاک‌سازی اطلاعات ناشی از پرتوگیری‌های قبلی در نمونه‌ها، فرایند بازپخت نمونه‌ها به صورت مجزا از فرایند ذکر شده در شکل ۴ بررسی شد. بهترین ترکیب دما و زمان، دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه به دست



شکل ۶. نمودار محوشدگی ذرات کلرید پتاسیم در مدت ۲۱ روز.



شکل ۵. منحنی تاثیر میزان ناخالصی بر شدت پاسخ ذرات کلرید پتاسیم.

دو ناحیه نسبتاً هموار و دو پرش را نشان می‌دهد که گویای این مطلب است که منحنی درخشندگی دو قله دارد.

از دیگر روش‌های تعیین قله و همچنین پارامتر سینتیک منحنی درخشندگی ترمولومینسانس روش برازش کامپیوتری مبتنی بر مدل‌های سینتیکی است. این برنامه کامپیوتری مبتنی بر الگوریتم لوبنرگ-مارکواریت^۱ و بر اساس تکرار بوده و با استفاده از پارامترهای هندسی قله تجربی از جمله I_m و T_m و با انطباق با نتایج تئوری، قله تجربی را برازش می‌کند. برای تعیین پارامترهای سینتیک که تابعی از شدت بیشینه و دمای بیشینه است از معادله زیر استفاده شد [۱۳ و ۱۴]:

$$I(T) = I_m \frac{b}{b-1} \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) \times \left\{ \frac{T_m^r}{T_m^r} (b-1) \left(1 - \frac{r k T}{E}\right) \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) + 1 + (b-1) \frac{r k T_m}{E} \right\}^{b-1} \quad (1)$$

b پارامتر سینتیک بین ۱ و ۲، E انرژی فعال‌سازی، T دما بر حسب کلوین، T_m دمای بیشینه و K ثابت بولتزمن است.

همچنین برای تعیین میزان انطباق منحنی ترمولومینسانس تئوری و تجربی از رابطه FOM به صورت زیر استفاده شد.

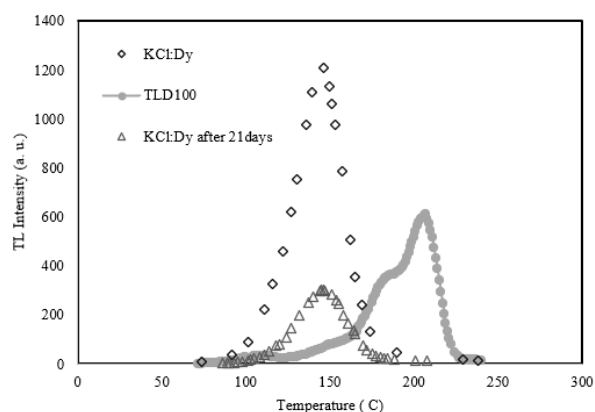
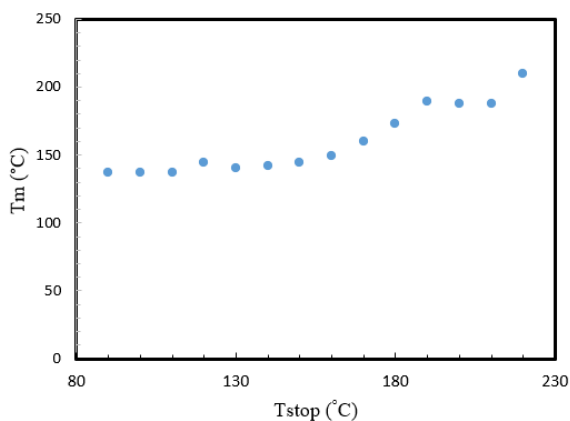
$$FOM = \frac{\sum |y_i - f_i|}{\sum y_i} \times 100 \quad (2)$$

دستگاه قرائت شدند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پاسخ ترمولومینسانس در مدت ۲۱ روز گرچه کاهش بسیار داشته اما به دلیل شدت پاسخ بسیار بالا، همچنان از این نظر قابل مقایسه با این دزسنج تجاری است. همچنین در شکل ۷، مقایسه حساسیت نمونه ساخته شده با نمونه تجاری TLD۱۰۰ در روز اول و پس از گذشت ۲۱ روز از زمان پرتودهی مشاهده می‌شود. تقریباً حساسیت نمونه ساخته شده دو برابر حساسیت دزسنج TLD۱۰۰ است. اما پس از گذشت زمان ۲۱ روز حساسیت آن به نصف حساسیت TLD۱۰۰ رسیده است.

منحنی درخشش دزسنج‌های ترمولومینسانس از اصلی‌ترین داده‌ها در مطالعات است. یکی از موارد در مطالعات، اطلاع از تعداد قله‌های منحنی درخشش و پارامترهای سینتیک مربوط به آن قله‌ها است. یکی از روش‌های تعیین تعداد قله‌های منحنی درخشش TL، روش $T_m - T_{stop}$ است. در این روش، نمونه در دستگاه خوانشگر تا دمای توقف T_{stop} گرم شده و سپس سرد می‌شود و دوباره بدون خروج از دستگاه خوانشگر با آهنگ گرمادهی مشخص برای ثبت منحنی گرم می‌شود. این مراحل از دمای $90^\circ C$ شروع شده و تا دمای $250^\circ C$ با گام‌های 10° خاتمه می‌یابد.

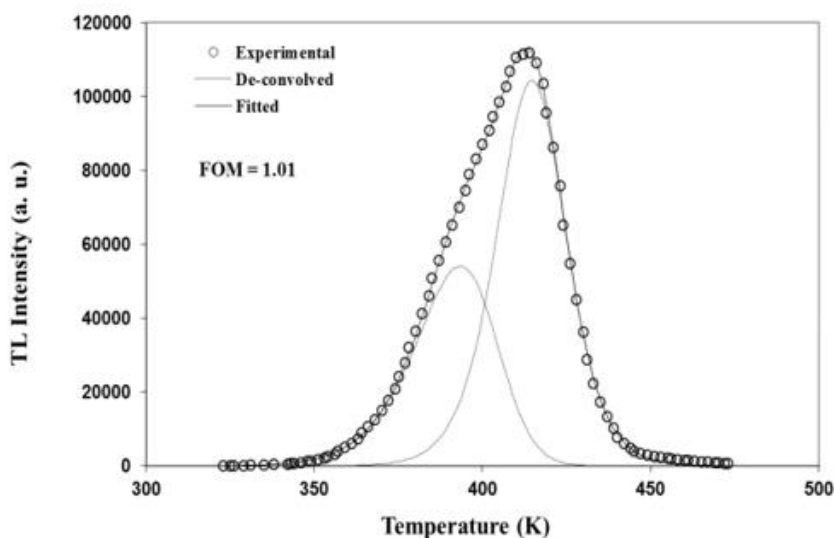
در نهایت T_m به صورت تابعی از T_{stop} رسم می‌شود. در این منحنی چندین ناحیه مسطح و چند پرش مشاهده می‌شود که نشان دهنده تعداد قله‌ها در منحنی درخشندگی است. شکل ۸

۱. Levenberg-Mar quart



شکل ۷. نمودار مقایسه حساسیت ذرات دیسپرسیوم سنتز شده با کلرید پتاسیم و نمونه تجاری TLD100 با پرتودهی گاما به میزان ۱ گری یک روز پس از پرتودهی و ۲۱ روز پس از پرتودهی.

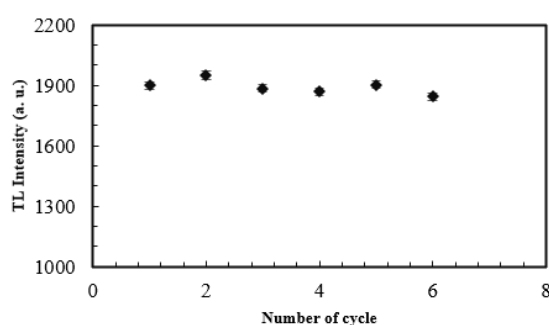
شکل ۸. دمای بیشینه منحنی درخشندگی T_m به صورت تابعی از دمای توقف T_{stop} .



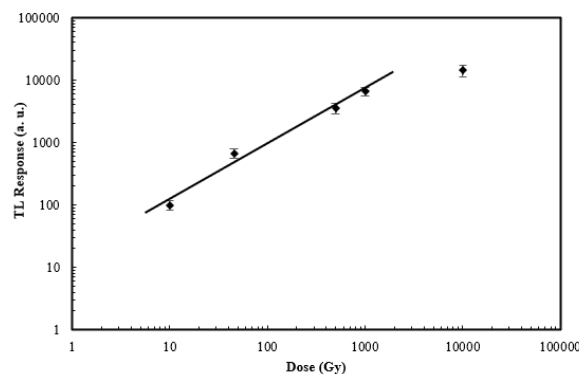
شکل ۹. منحنی برازش کامپیوتری بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم.

یکی از اصلی‌ترین شرایط یک دزسنج آرمانی داشتن یک پاسخ خطی برای دزهای مختلف است. به این منظور میکروذرات کلرید پتاسیم با چشمه ^{60}Co در دزهای مختلف از ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ Gy مورد پرتودهی قرار گرفتند. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود پاسخ ذرات تا دز ۱۰۰۰ Gy خطی است.

که y_i مربوط به داده‌های تجربی و f_i بهترین مقادیری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید [۱۵]. در شکل ۹، منحنی تابش ۲ قله در دماهای ۳۹۳ و ۴۱۵ کلوین دارد. مقدار FOM، ۱/۰۱ است که نشان دهنده انطباق خوب مقادیر تئوری و تجربی است؛ چون اگر مقادیر کمتر از ۲/۵ درصد باشد قابل قبول بوده و انطباق خوبی بین نتایج برازش و داده‌های تجربی وجود دارد.



شکل ۱۱. بررسی تکرارپذیری پاسخ ترمولومینسانس کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم با دز 100 Gy .



شکل ۱۰. منحنی درخشش ذرات KCl:Dy برای دزهای مختلف از 10 تا 100000 Gy .

اشاره کرد. همچنین بالا بودن میزان حساسیت این بلور یکی از ویژگی‌های مورد توجه در کاربرد آن در دزسنجی است. طیف فوتولومینسانس این بلور طیف گسیلی پهن در دمای 380 نانومتر دارد. بهینه زمان و دمای تف دادن در 30 دقیقه و در دمای 700 درجه سانتیگراد و بهینه ترکیب دما و زمان فرایند بازپخت 400 درجه سانتیگراد به مدت 30 دقیقه تعیین شد. میزان بهینه ناخالصی برای داشتن بیشترین حساسیت ترمولومینسانس بلور 0.5 مول درصد بود. محوشدگی بلور کلرید پتاسیم در 21 روز، و همچنین مقایسه میزان حساسیت بلور کلرید پتاسیم با ناخالصی دیسپرسیوم پس از 21 روز با نمونه تجاری 100 TL ، نشان می‌دهد که شدت حساسیت این بلور بسیار بالا بوده و همچنین پاسخ خطی دز تا 1000 گری این دزسنج را نامزد بسیار مناسبی برای دزسنجی می‌کند.

یکی از مواردی که در استفاده از هر رژیم حرارتی در بازپخت نمونه‌های دزسنج باید بررسی شود، بررسی تکرارپذیری این فرایند است. در تعیین تکرارپذیری رژیم تابکاری به دست آمده، نمونه‌های یکسان 6 مرتبه متوالی در مراحل تابکاری (در دمای 400 درجه سانتیگراد به مدت 30 دقیقه)، پرتودهی و قرائت مورد آزمایش قرار گرفت و پاسخ ترمولومینسانس آن ثبت شد که نتایج در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های ساخته شده در تکرار این مراحل تقریباً ثابت است.

۴. نتیجه‌گیری

فسفر کلرید پتاسیم به روش هم‌رسوبی، با هدف مطالعه خواص دزسنجی ساخته شد. از جمله نکات قابل توجه در رابطه با روش هم‌رسوبی، به ارزان بودن و مدت زمان کوتاه ساخت نسبت به سایر روش‌های تولید می‌توان

مراجع

1. L Rey, *Physica A*, **323** (2003) 67.
2. P K Manimozhi, et al., *Research B* **264** (2007) 329.
3. M K Shoushtari, et al., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* **887** (2018) 128.
4. E Sadeghia, and al., *Applied Radiation and Isotopes* **136** (2018) 111.
5. A T Davidson, and et al., *Phys. Stat Sol. (c)* **4** (2007) 1044.
6. R Bernal and M Barboza-Flores. *Superficies y Vacio*. **13** (2001).
7. M Mehrabi, et al., *Nucl. Instrum. Metho. Phys.* **A846**, 87 (2017) 24.

12. P M Bhujbal and S J Dhoble. *Luminescence*. **28** (2013) 879.
13. G G Kitis, et al., *J. Phys. D:Appl. Phys.* **31** (1998) 2636.
14. K S Chung, et al., *Radiation Protection Dosimetry*. **115**, 1-4 (2005) 345
15. H G Balian and N W Eddy. *Nucl. Instr. Meth.* **145** (1977) 389.
8. S Bangaru and G Muralidharan. *Physica B* **407** (2012) 2185.
9. V Chernov, et al., *Radiation Protection Dosimetry* **100**, 1-4 (2002) 425.
10. S Polosan, et al., *J. Optoelectronics and advanced materials* **10** (2008) 3008.
11. S Bangaru and G Muralidharan. *Radiation Effect and Defects in Solids*. **169** (2014) 9.