



رشد تک بلورهای BaCl_2 و $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ و تعیین خواص نوری آن‌ها به منظور دست‌یابی به محیط آشکارسازی تابش یونندهی گاما

زهرآ دررئز*، اسماعیل جنگجو، حسین کلباسی، مجتبی اسماعیل‌نیا، حیدر فری‌پور، راحله خطیری، نوراله‌علی اکبری
پژوهشکده مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: نمونه بلورهای BaCl_2 و $\text{BaCl}_2:\text{Eu}$ از پودرهای BaCl_2 و EuCl_2 با خلوص به ترتیب برابر با ۹۹.۹۹۵ و ۹۹.۹۹۹ درصد در بوتله‌های گرافیتی و در اتمسفر خشک رشد داده شدند. نتایج تجزیه‌ی پرتو ایکس به وسیله‌ی دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD)، خلوص فاز و تشکیل فاز اورتورومبیک در بلور را تأیید کرد. مقدار ناخالصی با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده‌ی القایی (ICP) تعیین گردید. میزان فلوروسانس، برانگیزش و نیز طیف عبوری، جذبی، به ترتیب، با طیف نورسنج‌های Cary-Eclipse WinFLR و Cary 17D به دست آمد. ضریب عبور تقریبی ۸۰ درصد در طیف عبوری، شفافیت و خلوص نسبی بلور با خروج آلاینده‌های ترکیبات اکسیژنی از محفظه‌ی دستگاه رشد بلور را محرز ساخت. در مقایسه‌ی طیف لومینسانس دو تک بلور BaCl_2 با و بدون ناخالصی Eu^{2+} ، ظهور قله‌ی تیز نشری با پهنای نیم ارتفاع کم (۳۰nm) در طول موج ۴۰۰nm، با افزایش بهره‌ی اپتیکی بلور میزبان همراه بود و این، اثر Eu به عنوان یک یون فعال اپتیکی در محیط بلور BaCl_2 را مطرح ساخت. با توجه به نتایج اپتیکی حاصل می‌توان انتظار داشت که محیط تک بلور اپتیکی $\text{BaCl}_2:\text{Eu}$ با گسیل فوتون خروجی در ناحیه‌ی مرئی طیف الکترومغناطیسی، امکان دست‌یابی به آشکارسازی تابش یوننده را فراهم آورد.

کلیدواژه‌ها: رشد بلور، خواص نوری، تابش یونندهی گاما، باریم کلرید

Single Crystal Growth of BaCl_2 & $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ and Their Optical Characterisation for Ionizante Gamma Radiation Detection

Z. Dorriz*, E. Jangjoo, H. Kalbasi, M. Esmailnia, H. Faripour, R. Khatiri, N.A. Akbari
Material Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-836, Tehran – Iran

Abstract: Single Crystals of Orthorhombic BaCl_2 and $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ were grown using a home-made Czochralski system by extracting from the melt in a carbon crucible, and argon atmospheric pressure upon using BaCl_2 and EuCl_2 powders of 99.995% and 99.99% purity, respectively. The results corresponding to XRD analysis for the grown crystals confirm the phase purity and the orthorhombic structural phase of the grown BaCl_2 and $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ crystals. The ICP model Optima-2100 was also used to measure Eu^{2+} ion concentration. The fluorescence emission, excitation and absorption spectra were obtained using a Cary-Eclipse WinFLR fluorometer and a Cary17D spectrophotometer. The prepared crystalline samples found to be colorless and transparent with no observed cleavage. Therefore, excluding OH^- , oxygen and carbon contaminations from the growth system was to some extent a successful result, which is indicating that a transmittance coefficient of about 80% is considered as a suitable optical feature of the BaCl_2 single crystal. The study of photoluminescence spectroscopy of BaCl_2 single crystals, with and without Eu^{2+} ion impurity, showed that the occurrence of the high intensity and low band width (FWHM~30nm) PL-band of $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ sample at 400nm are indicating an increase of the optical efficiency compared with and without applying the impurity. As a result, it could be observed that the doped crystals with europium can be served as a luminescence material for radiation detectors.

Keywords: Crystal Growth, Optical Properties, Ionizing Radiation, Barium Chloride

*email: zdorriz@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۸/۱۱

۱. مقدمه

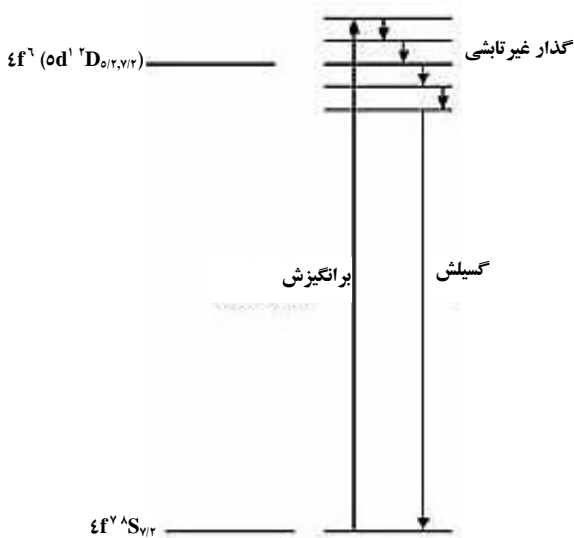
در کاربردهای فسفرهای ذخیره‌کننده انرژی، کاستی‌های موجود در بلور اهمیت خاصی دارند. از طریق ناخالصی‌ها در شبکه‌ی بلور می‌توان امکان تغییر ماهیت دام‌های درون ماده را فراهم نمود. در فسفرهای $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ ، فرض بر این است که به دام‌اندازی الکترون در تهی‌جای کلرید درون ماده رخ می‌دهد [۱، ۲]. تهی‌جاها که بار مثبت در جای‌گاه خود دارند، دارای پتانسیل الکتریکی نظیر پتانسیل سیستم هیدروژن‌گونه خواهند بود. ناخالصی کاتیون می‌تواند جای‌گزین یون باریم شود و دگرگونی در شبکه ایجاد نماید. در نتیجه، تهی‌جای کلرید در نزدیکی این ناخالصی موجب تشکیل مرکز F_A می‌شود که به تجربه پتانسیل متفاوتی از مرکز F^- را نشان دهد. این حالت در اکثر شبکه‌های بلوری BaCl_2 آلائیده شده با ناخالصی کاتیون‌های قلیایی حاکم است. اختلاف بار الکتریکی بین یون باریم (+۲) و یون قلیایی (+۱) به پتانسیل مؤثر منفی در مجاورت تهی‌جای کلرید منجر شده و در نتیجه تغییر ویژه‌ای را در پتانسیل مؤثر دام الکترونی فراهم می‌آورد [۲، ۳].

ماده‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، براساس بلور BaCl_2 در فاز اورتورومبیک بدون ناخالصی و با ناخالصی فعال‌ساز Eu^{2+} می‌باشد. در این ماده یون Eu^{2+} پاسخگوی لومینسانس می‌باشد. این نوع مرکز به دلیل افزودن ترکیبی غیر از عناصر ماده‌ی اصلی، مرکز ناخالصی غیرذاتی نامیده می‌شود. نور با طول موج واقع در گستره‌ی فرابنفش (UV) قادر است یون Eu^{2+} را از حالت الکترونی زمینه‌ی $4f^7$ به حالت الکترونی برانگیخته‌ی $4f^6 5d^1$ برساند (شکل ۱). این برانگیزش از $f \rightarrow d$ با پیروی از $\Delta l = -1$ صورت می‌گیرد و بر طبق اصل پائولی که گذار الکترونی با القای اپتیکی را برای $\Delta l = \pm 1$ (عدد کوانتمی تکانه‌ی زاویه‌ای مدار) مجاز می‌داند، مطابقت دارد. زمان گذار الکترونی از مرتبه‌ی 10^{-16} ثانیه است که به وضوح سریع‌تر از زمان ارتعاشات هسته‌ای از مرتبه‌ی 10^{-13} ثانیه می‌باشد [۴].

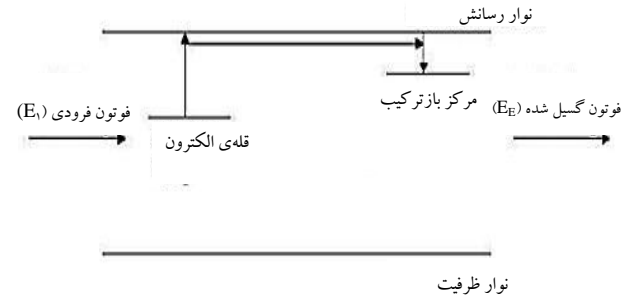
طول عمر حالت برانگیخته‌ی یون Eu^{2+} از مرتبه‌ی 10^{-6} ثانیه است. به این دلیل که این مدت زمان بسیار طولانی‌تر از دوره‌ی تناوب ارتعاشات شبکه‌ای است، این یون قادر است قبل از بازگشت به حالت زمینه‌ی $4f^7$ به پایین‌ترین تراز چندگانه‌ی حالت برانگیزش واپاشیده شود. این فرایند از طریق تولید فونون‌ها در واپاشی غیرتابان انجام می‌شود و اتلاف انرژی موجب جابه‌جایی نور گسیل شده به طول موج بلندتر می‌شود (جابه‌جایی

استوکس). از آن‌جا که پوسته‌ی $5d$ نسبت به سایر پوسته‌ها در بعد وسیعی از هسته‌ی Eu گسترده است، الکترون‌های برانگیخته شده به این پوسته با میدان بلوری به شدت برهم‌کنش می‌کنند. بنابراین، تراز انرژی پنج‌تایی $5d^1$ در میدان بلوری به پنج تراز انرژی مجزا با تقارن نسبی شکافته می‌شود. بدین علت برانگیختگی فونون‌ها موجب می‌شود که دامنه‌ی وسیعی از انرژی‌های مرتبط با پیکربندی $4f^6 5d^1$ در طیف نشری یک نوار پهن گسیلی را نتیجه دهد. این گسیلش تحت القای میدان کریستالی از پایین‌ترین ترازهای مجزا رخ می‌دهد [۴].

اعتقاد بر این است که در بلور لومینسان BaCl_2 به دام افتادن الکترون در مراکز F روی می‌دهد. زیرا دو جای‌گاه واحد در BaCl_2 با ساختار اورتورومبیک وجود دارد. مرکز F طبق تعریف، تهی‌جای آنیون در شبکه است و می‌تواند ذاتی و یا در حین تابش‌دهی ایجاد شده باشد. در نبود آنیون در محل شبکه‌ایش، تهی‌جای با بار مثبت مؤثر به وجود می‌آید. این مرکز با داشتن پتانسیلی نظیر پتانسیل یک اتم هیدروژن‌گونه می‌تواند الکترون را به دام بیندازد. طرح‌واره‌ی تراز انرژی واقعیت امر متفاوت است زیرا به توزیع یون‌های اطراف مراکز F بستگی دارد [۲، ۵]. با توجه به شکل ۲ محققین بر این باوراند که سازوکار انتقال انرژی بین مراکز دام $F-V_K$ و بازترکیب Eu رخ می‌دهد، به طوری که در بلور $\text{BaCl}_2:\text{Eu}$ ، مرکز Eu موجب ظهور قله‌ی لومینسانس بسیار شدید می‌شود و محیط اپتیکی مناسب برای سوسوزنی را فراهم می‌سازد [۶].



شکل ۱. نمودار تراز انرژی Eu^{2+} ، حالت زمینه $4f^7 \text{ } ^8S_{7/2}$ و حالت برانگیخته‌ی یون آزاد $4f^6 5d^1 \text{ } ^2D_{5/2, 7/2}$ (سمت چپ) با تفکیک ترازها بر اثر اعمال میدان بلوری (سمت راست) [۲، ۵].



شکل ۲. نمودار ساده‌ی فرایند لومینسانس فوتون- القا (PSL)^(۱). فوتون تابشی الکترون را از دام الکترونی برمی‌انگیزد. از باز ترکیب الکترون با یک حفره در مرکز باز ترکیب فوتون گسیل می‌شود. فوتون گسیلی از انرژی بالاتری نسبت به فوتون تابشی برخوردار است ($E_2 > E_1$) [۲، ۵].

۲. بخش تجربی

۱.۲ مواد، تجهیزات و روش کار

مقدار تقریبی ۷۰ گرم پودر $BaCl_2$ تهیه شده از شرکت مرک با خلوص ۹۹٫۹۹۵٪، چگالی ۳٫۰۹۶ و ضریب شکست ۱٫۶۴۶ در یک بوتله‌ی گرافیتی به قطر داخلی ۴۰ mm در کوره قرار داده شد. با استفاده از پمپ روتاری در درون کوره تا 10^{-3} torr خلا ایجاد شد. کوره به وسیله‌ی المنت مقاومتی با کنترل‌کننده‌ی PID گرم شد و محفظه‌ی رشد ابتدا در دمای پایین $120^\circ C$ و سپس $200^\circ C$ هر یک به مدت ۲۴ ساعت خشک و رطوبت‌زدایی گردید. در نهایت با استفاده از جریان گاز بی‌اثر Ar یا Ar/N_2 در دمای بالا و نزدیک به نقطه‌ی ذوب $BaCl_2$ ($970^\circ C$)، پودر $BaCl_2$ به صورت مذاب درآمد. سپس ماده‌ی مذاب برای همگن شدن به مدت تقریبی ۲۴ ساعت در این دما نگه داشته شد. مطابق با روش چکرالسکی رشد بلور با کاهش دما با آهنگ ۰٫۳ تا $0.5^\circ C/h$ و با سرعت کشش ۰٫۳ mm/h و سرعت دورانی ۳۰ دور بر دقیقه به انجام رسید.

بلور در دمای اتاق از محفظه‌ی رشد خارج و شکل‌دهی و پولیش آن در شرایط آغشته‌سازی بلور با پارافین و در محیط گاز بی‌اثر آرگون انجام گرفت. برای اندازه‌گیری مشخصات نوری از طیف نورسنج‌های جذب و لومینسانس استفاده شد. چون $BaCl_2$ جاذب رطوبت است و تمایل به تبدیل شدن به $BaCl_2$ دو آبه دارد، لازم بود آماده‌سازی، تهیه‌ی بلور و نیز اندازه‌گیری ساختاری و اپتیکی آن در حد امکان در محیط عاری از رطوبت (یا با رطوبت زیر ۲٪) انجام شود. تک بلورها به مراتب پایدارتر از شکل پودری هستند و در محیط آزمایشگاه کیفیت شفاف و بی‌رنگ خود را چندروزی حفظ می‌کنند. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودار ساده‌ای از دستگاه رشد بلور و تعدادی از بلورهای رشد داده شده را نشان می‌دهند.



شکل ۳. طرح‌واره‌ی دستگاه رشد بلور چکرالسکی و تجهیزات جانبی آن در زمان رشد بلور $BaCl_2$.

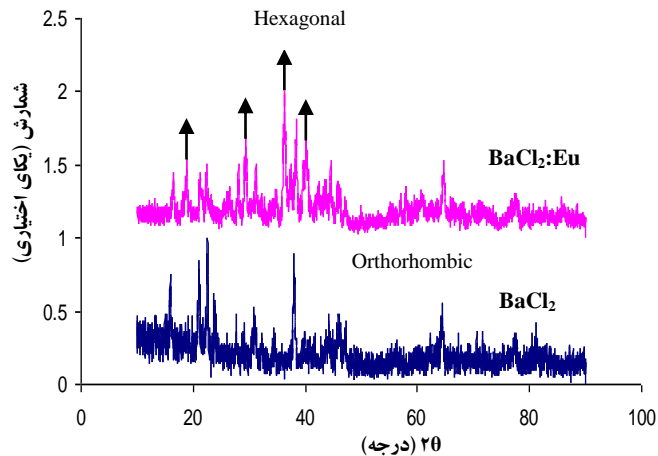


(الف)

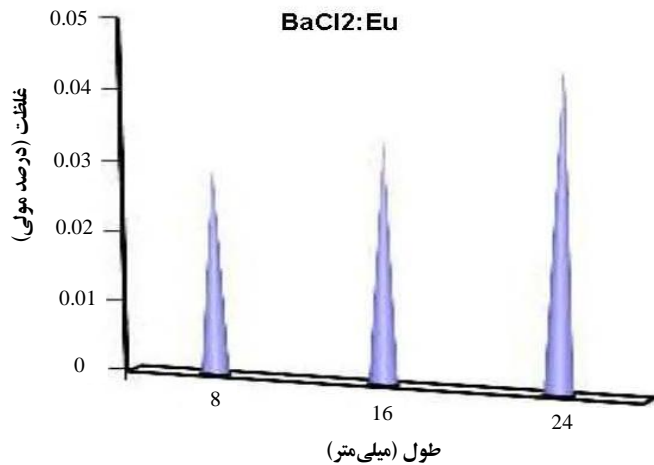


(ب)

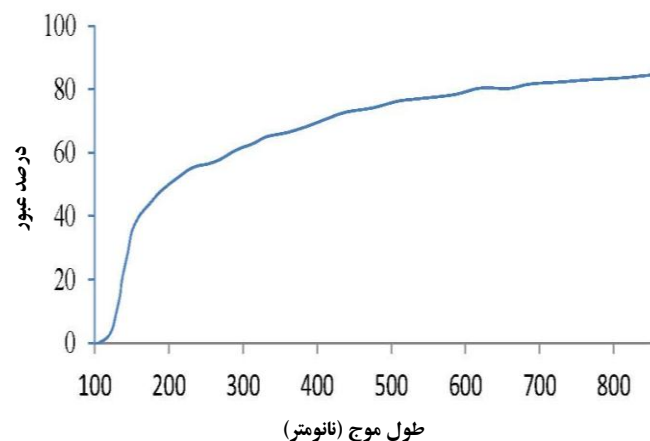
شکل ۴. نمونه‌ای از بلورهای $BaCl_2$ رشد داده شده بدون ناخالصی (a) و با ناخالصی $EuCl_2$ (۰٫۱ درصد مولی) (b).



شکل ۵. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های تک بلورهای $BaCl_2$ و $BaCl_2:Eu$ با مشخصه‌ی فازی اورتورومبیک و هگزاگونال.



شکل ۶. نمودار تغییرات غلظت ناخالصی Eu در طول بلور $BaCl_2:Eu$.



شکل ۷. بلور رشد داده شده در محدوده‌ی وسیعی از طیف الکترومغناطیسی در نواحی مرئی - فرابنفش از درصد عبور نزدیک به ۸۰٪ برخوردار می‌باشد و شفافیت بلور را مشخص می‌سازد.

۲.۲ تجزیه‌ی ساختاری

ترکیب فازهای نمونه‌ی بلور در دمای اتاق از طریق ثبت الگوی پراش پودری پرتو ایکس با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس با خط طیفی تابش تک رنگ K_{α} مس تعیین گردید. شکل ۵ مبین تشکیل فاز اورتورومبیک در دمای اتاق است.

۳.۲ اندازه‌گیری میزان فعال‌ساز اروپیم

مقدار Eu در برش‌های طولی یکسان به اندازه‌ی ۸ میلی‌متر در راستای بلور $BaCl_2$ رشد داده شده، با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده‌ی القایی مدل Optima 2100 اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است.

برای رشد یک تک بلور با مقدار مشخصی از ناخالصی محاسبه‌ی استوکیومتری مواد اولیه و ناخالصی شرط لازم است ولی کافی نمی‌باشد چرا که به دلیل وجود ضریب تفکیک^(۱)، غلظت ناخالصی در طول بلور رشد داده شده از مذاب یکنواخت نمی‌باشد. ضریب تفکیک با رابطه‌ی زیر داده می‌شود

$$K = \frac{C_s}{C_1} \quad (1)$$

که در آن، C_1 غلظت ناخالصی در مذاب است که برای Eu موجود در بوته، در ابتدای رشد، برابر با ۰٫۲ درصد مولی است؛ و C_s غلظت ناخالصی در بلور جامد می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود مقدار C_s برای هر منطقه از طول بلور متغیر بوده و مقدار آن به طور متوسط کم‌تر از ۰٫۱۸ مقدار اولیه‌ی C_1 می‌باشد. لذا با توجه به رابطه‌ی (۱) مقدار $K < 1$ می‌باشد، به عبارت دیگر ناخالصی موجود در هنگام رشد همواره از طرف بلور پس زده می‌شود و C_1 افزایش می‌یابد به شرط این که مقدار تبخیر ناخالصی از بوته زیاد نباشد. به فرض ثابت بودن K بدیهی است که مقدار C_s نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه شیب منحنی تغییر غلظت ناخالصی در طول بلور مثبت می‌شود.

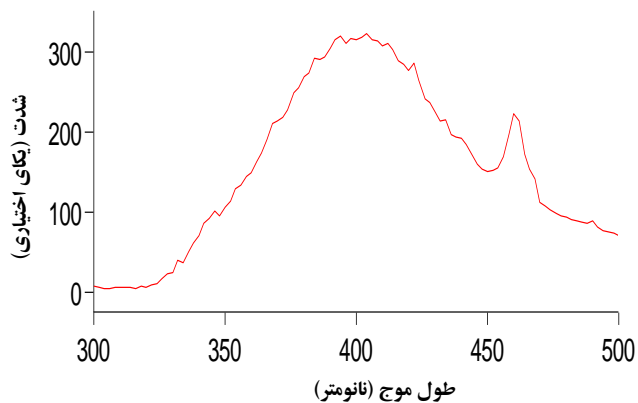
۴.۲ طیف‌نگاری عبوری - جذب (Trans-Abs)

در طیف‌نگاری تک بلور $BaCl_2$ با استفاده از طیف نورسنج Cary 17D مشخص گردید که با خارج کردن یون آلانیندهی هیدروکسی (OH)، ترکیبات اکسیژن‌دار (O^{2-}) و کربونیت از محفظه‌ی رشد و نیز با عملیات حرارتی مناسب، کیفیت نوری بالا (نزدیک به ۸۰٪ عبور) حاصل می‌شود (شکل ۷).

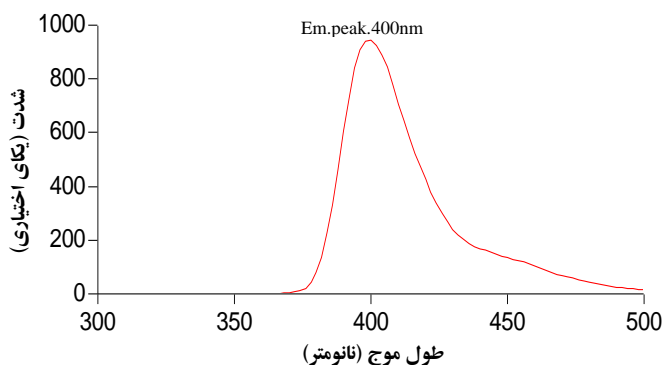
هم‌چنین در طیف نوری جذب مشخص می‌گردد که محل تشکیل نوارهای جذب در ناحیه‌ی فرابنفش (۲۰۰ تا ۳۰۰ nm) قرار دارد (شکل‌های ۸ و ۹).



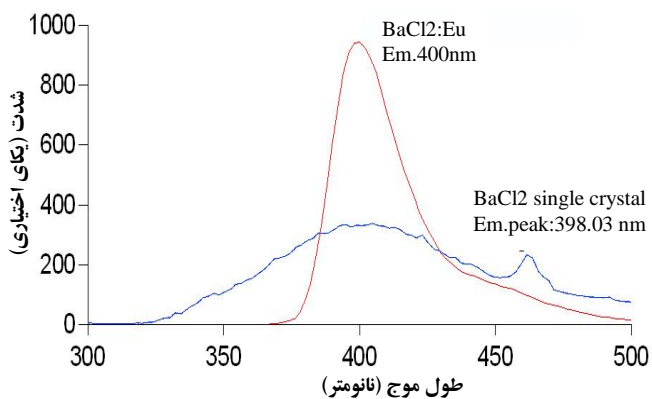
را می‌توان به نوع و مقدار ناخالصی نسبت داد. این، هم‌چنین، جابه‌جایی قله‌ی نشری به ناحیه‌ی طول موج‌های کوتاه‌تر طیف مرئی را دربر می‌گیرد (شکل ۱۲).



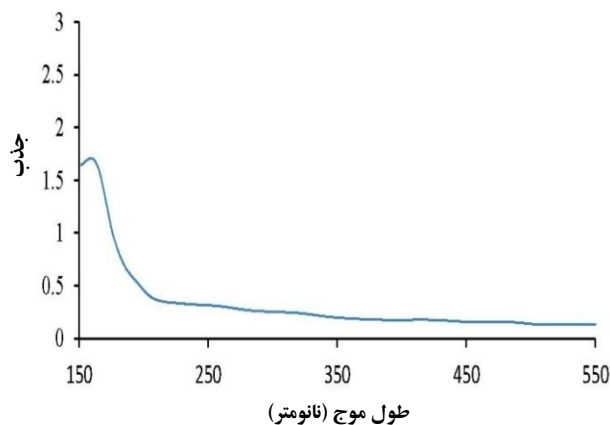
شکل ۱۰. طیف فوتولومینسانس (PL) تک بلور $BaCl_2$ بدون ناخالصی با پهنای نیم-ارتفاع تقریبی ۹۳ nm.



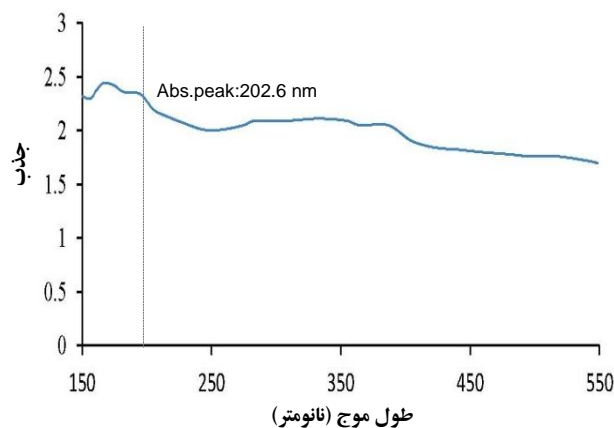
شکل ۱۱. طیف فوتولومینسانس تک بلور $BaCl_2:Eu$ با ترکیب ۰٫۱ درصد مولی از $EuCl_2$ با پهنای نیم ارتفاع تقریبی ۳۰ nm.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی شدت و جابه‌جایی قله‌ی نشری در طیف فوتولومینسانس دو بلور $BaCl_2$ با و بدون ناخالصی یون فعال‌ساز Eu^{2+} .



شکل ۸. طیف جذبی $BaCl_2$ بدون ناخالصی.



شکل ۹. طیف جذبی $BaCl_2$ با (۰٫۱ درصد) ناخالصی $EuCl_2$.

۵.۲ طیف‌نگاری فوتولومینسانس (PL)

طیف‌نگاری فوتولومینسانس بلورهای رشد داده شده، با استفاده از طیف‌سنج فلورئورسانی Cary Eclipse انجام شد. برای بلور $BaCl_2$ یک قله‌ی نشری در طول موج 398.03nm ، و در دنباله‌ی طیف، و یک قله‌ی ثانویه ضعیف در طول موج تقریبی 460nm به دست آمد. این دنباله مربوط به ناخالصی‌هایی چون ترکیبات اکسیژن‌دار و هیدروکسی می‌باشد (شکل ۱۰).

در طیف فوتولومینسانس تک بلور $BaCl_2:Eu$ یک قله‌ی نشری تیز با پهنای کم در طول موج 400nm مشاهده شد (شکل ۱۱) که این قله اثر Eu به عنوان یک یون فعال‌ساز نوری در بلور $BaCl_2$ را آشکار می‌سازد.

شدت اکثر علامت‌های فوتولومینسانس در ناحیه‌ی مرئی نه فقط به غلظت بلکه به فرایند تابکاری^(۳) نیز بستگی دارد. بنابراین در مقایسه‌ی دو بلور با و بدون ناخالصی یوروپیم که با فرایند تابکاری مشابه رشد داده شده‌اند، اختلاف شدت نوارهای نشری

**۳. بحث و نتایج**

برای باریم کلرید بدون آب تبلور دو ساختار متفاوت تابع درجه حرارت وجود دارد: شکل مکعبی بتا در درجه حرارت‌های بالا و شکل آلفا در درجه حرارت‌های پایین (دمای اتاق). باید توجه داشت که هیچ فاز مکعبی پس از آب‌زدایی باقی نمانده باشد. وقتی در کوره در دمای 200°C رطوبت‌گیری می‌شود، هر دو شکل ساختاری اورتورومبیک و هگزاگونال این ماده تشکیل می‌شود [۲، ۷]. این نتیجه در الگوی پراش پرتو ایکس بلورهای $\text{BaCl}_2:\text{Eu}$ و BaCl_2 در شکل ۵ مشهود است.

برای تحلیل قله‌های نوار جذبی، سعی شده است با تنظیم پهنای شکاف باریکه‌ی نور در حداقل مقدار آن، حداکثر حساسیت طیف نورسنج Cary 17D نتیجه گرفته شود. شکل ۹، قله‌ی مشخصه‌ی طیف جذبی $\text{BaCl}_2+0.1\%$ درصد مولی EuCl_2 را در ناحیه‌ی فرابنفش طیف (۲۰۰ تا 300nm) نشان می‌دهد. در مقایسه بین شکل ۸ و شکل ۹ نوار جذبی در 202.6nm مربوط به ناخالصی Eu می‌باشد.

طیف فوتولومینسانس نمونه‌ی BaCl_2 (شکل ۱۰)، یک قله‌ی پهن (پهنای نیم ارتفاع تقریباً 93nm) و در عین حال با شدت پایین را در طول موج 398.2nm و یک قله‌ی ثانویه‌ی به مراتب ضعیف‌تری را در طول موج تقریبی 460nm نشان می‌دهد. این بدان معنی است که در BaCl_2 ، اکسیتون‌ها از طریق واپاشی غیرتابان واپاشیده می‌شوند و دنباله‌ی ضعیف‌تر طیف به ترکیبات اکسیژنی مربوط است (شکل ۱۰). با افزودن ناخالصی Eu^{2+} ، قله‌ی فوتولومینسانس باریک‌تر (پهنای نیم ارتفاع تقریباً 30nm) و با افزایش شدت تقریباً تا سه برابر به ناحیه‌ی مرئی ($\geq 400\text{nm}$) جابه‌جا می‌شود به طوری که در طیف فوتولومینسانس بلور BaCl_2 با 0.1% درصد مولی از ناخالصی EuCl_2 (شکل ۱۱) نیز باند نشری در ناحیه‌ی 400nm به دست آمده است که با مراجع [۸، ۹، ۱۰] سازگاری دارد. در این طیف، وقتی طول موج برانگیختگی در 240nm ثابت نگه‌داشته می‌شود، گذار از حالت برانگیخته‌ی $4f^6 5d$ به $4f^7$ مربوط به عنصر Eu^{2+} اتفاق می‌افتد. بنابراین آلاینده‌ی Eu ، افزایش بهره‌ی نوری لومینسانس بلور میزبان BaCl_2 را نتیجه می‌دهد و به عنوان عامل فعال‌ساز نوری عمل می‌کند (شکل ۱۲).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نوری حاصل از بلور $\text{BaCl}_2:\text{Eu}$ امکان آشکارسازی فوتون در ناحیه‌ی آبی طیف الکترومغناطیس از طریق سوسوزنی را امکان‌پذیر می‌سازد. البته مقدار غلظت Eu در هر دو پارامتر شدت نشر و ظهور قله‌ی لومینسانس تأثیر دارد. به دلیل نم‌گیری بسیار زیاد ماده‌ی BaCl_2 ، برای نیل به بهره‌ی نوری مطلوب و ماندگاری نمونه، لازم است تمام مراحل آماده‌سازی، تجزیه و نگه‌داری بلور در شرایط خلاء بالا ($\geq 10^{-5}$ torr) و در محیط گاز بی‌اثر آرگون به انجام برسد.

پی‌نوشت‌ها:

1. Photostimulated Luminescence
2. Segregation Coefficient
3. Annealing

منابع:

1. S. Schweizer, J.-M. Spaeth, M. Secu, A. Edgar, G.V.M. Williams, Photostimulable defects in nano-crystallites in fluorozirconate glasses, Phys. Stat. Sol(a), **202**(2) (2005) 243-249.
2. Jeremy Robinson, A photo and thermally stimulated luminescence study of $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ with application to neutron imaging, Victoria University of Wellington (2008).
3. G.A. Appleby, A. Edgar, G.V.M. Williams, A.J.J. Bos, Photostimulated luminescence from $\text{BaCl}_2:\text{Eu}^{2+}$ nanocrystals in lithium borate glasses following neutron irradiation, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 101902/1-101902/3.
4. J.M. Spaeth, Recent developments in X-ray storage phosphor materials, Rad. Meas. **33**(5) (2001) 527-532.
5. L. Bottler-Jensen, S.W.S. Mckeever, A.G. Wintle, Optically stimulated luminescence dosimetry, Amsterdam:Elsevier Science B.V. (2003).
6. J. Selling, M.D. Birowosuto, P. Dorenbos, S. Schweizer, Europium-doped barium halide X-ray scintillators, Phys. Stat. Sol.(c) **4**(3) (2007) 976-979.



7. E.B. Brackett, T.E. Brackett, R.L. Sass, The crystal structures of Barium Chloride, Barium Bromide, and Barium Iodide, J. Amer. Chem. Soc. **67** (1963) 2132-2135.
8. B. Tanguy, P. Merle, M. Pezat, C. Fouassier, Emission f-f de l'euporium divalent dans les phases MFCI ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) et BaLiF_3 , Mater. Res. Bull. 9 (1974) 831-836.
9. G. Blasse, On the nature of the Eu^{2+} luminescence, Phys. Status. Solidi (b) **55** (1973) k131-k134.
10. H.G. Lipson, J.J. Larkin, B. Bendow, S.S. Mitra, Molecular-impurity absorption in KCl for infrared laser windows, J. Electron, Mater. **4**(1) (1975) 1-24.