



ساخت نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم به روش هم‌رسوبی و بررسی اثر اندازه‌ی نانوبلورها بر ویژگی‌های لیانی و زمان فروافت آن‌ها

امین آقائی خاریکی، خدیجه رضایی ابراهیم سرایی*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان - ایران

چکیده: در این پژوهش نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم در اندازه‌های بلوری مختلف به روش هم‌رسوبی و با تابکاری مواد در دماهای متفاوت تهیه شدند. ویژگی‌های ساختاری و اندازه‌ی نانوبلورهای مختلف به دست آمده در دماهای متفاوت با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس و میکروسکوپی الکترون عبوری (TEM) بررسی شد. همچنین، ساختار اتمی نانوبلورهای مختلف در تشکیل گارنت با استفاده از طیف‌نمایی تبدیل فوریه-زیرقرمز (FTIR) بررسی شد. اثر تغییرات اندازه‌ی نانوبلورهای مختلف تشکیل شده بر مقدار انرژی جذبی با طیف‌بینی دیدگانی-فرانفش بررسی شدند. طیف‌های نشری و برانگیختگی پودرهای نانو ساختار آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. زمان فروافت برای نانوبلورهای با اندازه‌های مختلف در دمای اتاق بررسی شد. تغییر اندازه‌ی نانوبلورها بر زمان فروافت مؤثر است. همچنین، بررسی طیف نشری نمونه‌ی گارنت آلائیده با تربیم نشان داد که این ترکیب می‌تواند به عنوان یک سوسوزن مناسب در سیستم‌های آشکارسازی مورد استفاده‌ی پزشکی تشخیصی و درمانی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: نانو بلور، لوتسیم آلومینیم گارنت، تربیم، زمان فروافت

Synthesis and Investigation of Different Nano Crystals Impact Prepared by Co-Precipitation Method on Luminescence and Decay Time Properties of Tb Doped LuAG Nano Crystal

A. Aghay Kharieky, Kh. Rezaee Ebrahim Sarae*

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advance Sciences and Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan-Iran

Abstract: In this research work, different terbium doped lutetium aluminium garnet nano crystalline powders were prepared by the co-precipitation method in different sizes at different annealing temperatures. The structural properties and size of the different nano crystalline powders prepared at different temperatures were investigated by the X-ray diffraction pattern and TEM. Also, the atomic structure of different nano crystals in garnet forming was studied by Fourier Trans from Infrared (FTIR) method. The impact of different crystallite sizes on the absorption energy was investigated by the UV-visible spectroscopy. The emission and excitation spectra of terbium doped lutetium aluminium garnet nano-structure powders were measured at room temperature. The decay time of different nano crystalline with different sizes was examined at room temperature. The change of nanocrystalline size affects the decay time. Also, the investigation of terbium doped garnet emission spectra showed that this material can be used as an appropriate scintillator for detection systems such as medical diagnostic and therapeutic.

Keywords: Nanocrystal, LuAG, Terbium, Decay Time

۱. مقدمه

مواد سوسوزن برای آشکارسازی تابش‌های پرنرژری و ذره‌های باردار به کار گرفته می‌شوند. برای نمونه، در مرکزهای تشخیصی و درمانی در سیستم‌های مورد استفاده‌ی CT، SPECT و PET آشکارسازهای سوسوزن وجود دارند. امروزه پژوهش‌های فراوانی برای یافتن ترکیب‌های سوسوزن با ویژگی‌های مناسب؛ مانند توان توقف بالای انرژی و بازده انرژی مطلوب در حال انجام است و هر ساله مواد سوسوزن جدید توسط دانشمندان معرفی می‌شوند [۱-۳]. مواد اکسیدی با ساختار گارنت مانند لوتسیم آلومینیم گارنت ($\text{Lu}_2\text{Al}_2\text{O}_7$) به واسطه‌ی داشتن عدد اتمی و چگالی بالا دارای ویژگی‌های لیانی مطلوبی هستند که توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند و گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای سوسوزنی هستند [۴-۷]. ترکیب‌های گارنت به خاطر برخورداری از پایداری شیمیایی، هم‌چنین سختی تابشی و به خاطر داشتن بازده لیانی مطلوب هنگامی که با عناصر خاکی نادر آلاییده می‌شوند دارای ویژگی‌های خوب و مناسب‌اند و در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده شده‌اند. از جمله‌ی عناصر خاکی نادر که در پژوهش‌های زیادی استفاده شده‌اند می‌توان به تربیم اشاره کرد. ترکیب لوتسیم آلومینیم گارنت آلاییده شده با تربیم دارای طیف نوری مطلوب در بازه‌ی دیدگانی ۵۰۰ nm تا ۶۰۰ nm است که در تطابق بسیار خوب با حساسیت بسیاری از سیستم‌های آشکارسازی نوری نظیر لوله‌های تکثیرکننده‌ی فوتونی (PMT) تجاری است [۸-۹]. فن‌آوری نانو و نانو مواد به واسطه‌ی ویژگی‌های متفاوت و جالب خود توجه بسیاری از دانش‌ها را در فراهم کردن مواد با کارایی بهتر جلب کرده‌اند. تغییر شکل و خواص فیزیکی و سطح‌های انرژی در دسترس نانو مواد در مقایسه با هم‌تایان میکرو و حجیم، ویژگی‌های متفاوتی را به نمایش می‌گذارند، به گونه‌ای که مطالعه‌ی مواد در اندازه‌های متفاوت، دارای ویژگی‌های متفاوت همانند ویژگی‌های نوری، گاف‌های نواری متفاوت و زمان فروافت متفاوتی هستند [۱۰-۱۱].

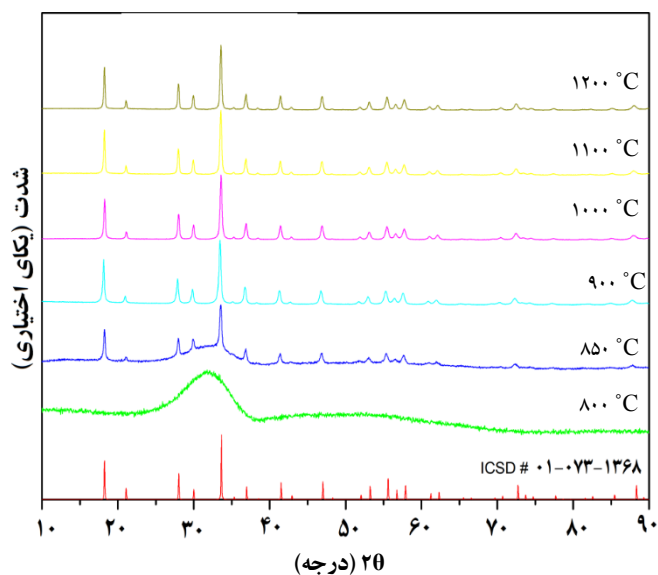
ترکیب لوتسیم آلومینیم گارنت آلاییده شده با تربیم به خاطر داشتن ویژگی‌های خوب گارنت و هم‌چنین ویژگی‌های مطلوب طیف سوسوزنی تربیم مورد توجه بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. ترکیب‌های حجیم فراوانی از این ماده ساخته شده است و هم‌چنین نانو پودر با این ویژگی تهیه شده است، ولی در مورد اثر اندازه‌ی نانوبلورها بر ویژگی‌های لیانی و هم‌چنین تأثیر اندازه‌ی نانو مواد تهیه شده بر زمان فروافت اطلاعاتی در دسترس نیست. بنابراین در

این پژوهش سعی شده است که اثر تغییر اندازه‌ی مواد لیانی گارنت آلاییده شده با درصد مشخصی از تربیم به ویژه بر زمان فروافت مطالعه شود.

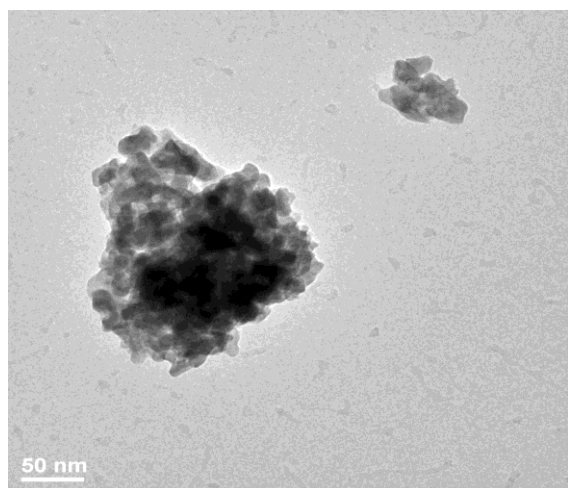
۲. روش کار

نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت ($\text{Lu}_2\text{Al}_2\text{O}_7$) آلاییده شده با تربیم که به اختصار LuAG:Tb نامیده می‌شود به روش هم‌رسوبی ساخته شد. برای تهیه‌ی مقدار مشخصی از نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلاییده شده با تربیم، ابتدا لوتسیم اکسید به همراه ۱ تربیم اکسید و مقدار کمی آب مقطر بر روی گرمکن (منبع حرارت) قرار داده شد. سپس مقدار کمی نیتریک اسید به آن اضافه شد تا کل ترکیب در آب مقطر حل شده و ترکیب نیترات آن به دست آید. سپس مقدار مشخصی از آلومینیم نیترات نوناهدرات که در حداقل آب مقطر حل شده بود به محلول لوتسیم و تربیم نیترات پیش از این به دست آمده اضافه شد. در ادامه، محلول نیترات به دست آمده، به صورت قطره قطره به عامل رسوب‌دهنده‌ی آمونیم هیدروژن کربنات (AHC) و آب آمونیاک (۲N) که بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار داشت اضافه شد تا رسوب شکل گیرد. پس از پایان اضافه شدن محلول نیترات، کل مخلوط به مدت یک ساعت بر روی هم‌زن مغناطیسی هم زده شد. رسوب به دست آمده با سانتریفوژ از محلول جدا شده و چندین بار با آب مقطر شست‌شده و در سانتریفوژ تحت عملیات جداسازی قرار گرفت. رسوب پایانی به مدت ۲۴ ساعت در دمای 90°C در خشک‌کن قرار داده شده تا خشک شود. در پایان برای تهیه‌ی نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلاییده شده با تربیم در اندازه‌های نانوبلوری مختلف، قسمتی‌هایی از پودر خشک شده، در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و 1200°C تابکاری شد.

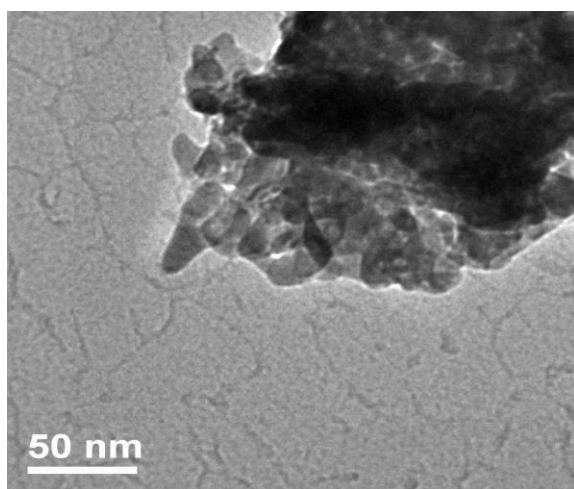
برای بررسی ساختار و اندازه‌ی نانوبلورهای تشکیل شده در دماهای مختلف، از دستگاه پراش پرتو ایکس پانالیتیکال^(۱) ساخت هلند و میکروسکوپ الکترون عبوری (FEI Tecnai G2 20 X-TWIN) استفاده شد. نمونه‌ها با تابش $K\alpha$ مس با طول موج 1.5406 \AA پرتو دهی شدند. به منظور تأیید شکل‌گیری ساختار گارنت و پیوندهای اتمی، از طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز ترموسایتیفیک نیکولت i-55^(۲) استفاده شد. اثر تغییر اندازه بر مقدارهای انرژی جذبی نانوبلورهای مختلف با



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های نانوبلور لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم، تهیه شده در دماهای مختلف.



(الف)



(ب)

شکل ۲. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون عبوری (TEM) نانوبلورهای تهیه شده به روش هم‌رسوبی در دماهای الف) ۹۰۰ °C و ب) ۱۲۰۰ °C.

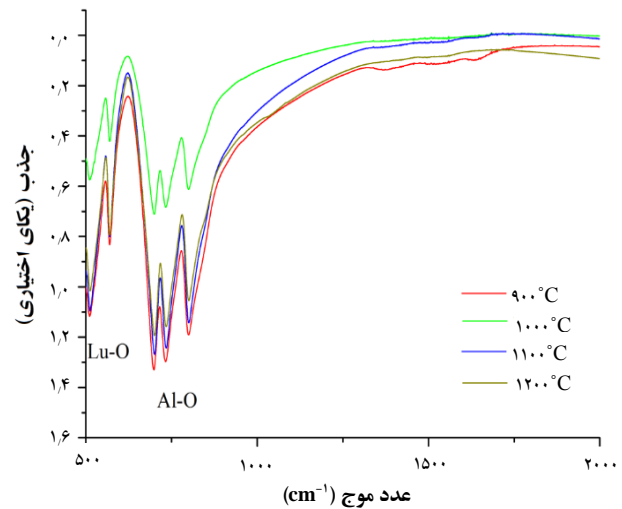
استفاده از طیف‌سنجی دیدگانی-فرابنفش گری واریان- $5E^{(3)}$ مطالعه شد. ویژگی‌های لیانی (طیف گسیلی و برانگیزش) و زمان فروپاشی نانوبلورهای مختلف با استفاده از طیف‌سنج فلورسانسی FLS980 ادینبورگ اینسترومنتس^(۴) بررسی شدند.

۳. نتایج

الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم تهیه شده در دماهای متفاوت (شکل ۱) نشان می‌دهد که ساختار بلوری برای گارنت با شروع از دمای ۹۰۰ °C شکل می‌گیرد و نانوبلورها دارای ساختار مکعبی‌اند. اندازه‌ی متوسط نانوبلورها با استفاده از روش ریتولد برای پودرهای تهیه شده در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ °C محاسبه شد. اندازه‌ی متوسط نانوبلورها ۳۴، ۳۹، ۴۳ و ۴۵ nm بود. شکل ۲-الف و ۲-ب ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون عبوری نانو-بلورهای با کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین اندازه‌ی به دست آمده در دماهای ۹۰۰ °C و ۱۰۰۰ °C را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نانوبلورها دارای شکل شبه‌کروی بوده و تمایل به توده شدن نیز با افزایش دما افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقایسه‌ی شکل ۲-الف و ۲-ب به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش دمای تابکاری، اندازه‌ی پودرهای نانو ساختاری تهیه شده نیز افزایش یافته است. به منظور بررسی و تأیید ساختار گارنت برای نانوبلورهای به دست آمده، طیف تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز (FTIR) آن‌ها نیز مطالعه شد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، پیوندهای Lu-O و Al-O شکل‌گیری ساختار گارنت برای ترکیب‌های بلوری را تأیید

می‌نماید. هم‌چنین به منظور بررسی اثر اندازه‌ی نانوبلورهای مختلف بر مقدارهای انرژی جذب شده، طیف دیدگانی-فرابنفش نانوبلورهای با اندازه‌های مختلف تهیه شده در دماهای مختلف بررسی شد. برای تعیین مقدار انرژی جذب شده، از طیف انعکاسی، نمودارهای تائوک و رابطه‌ی کیوبلکا-مانک $[(F(R).hu)^{vn} = A(hu - E_g)]$ استفاده شد [۱۲]. که در آن $F(R)$ ، A ، hu و E_g به ترتیب، ضریب جذب، مقدار ثابت، انرژی فوتون و انرژی جذب شده هستند. مقدار n برای گذارهای مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ است. مقدار انرژی جذب شده E_g ، از رسم نمودار $(F(R).hu)^{vn}$ برحسب hu و برون‌یابی ناحیه‌ی خطی برای $(F(R).hu)^{vn} = 0$ به دست می‌آید.

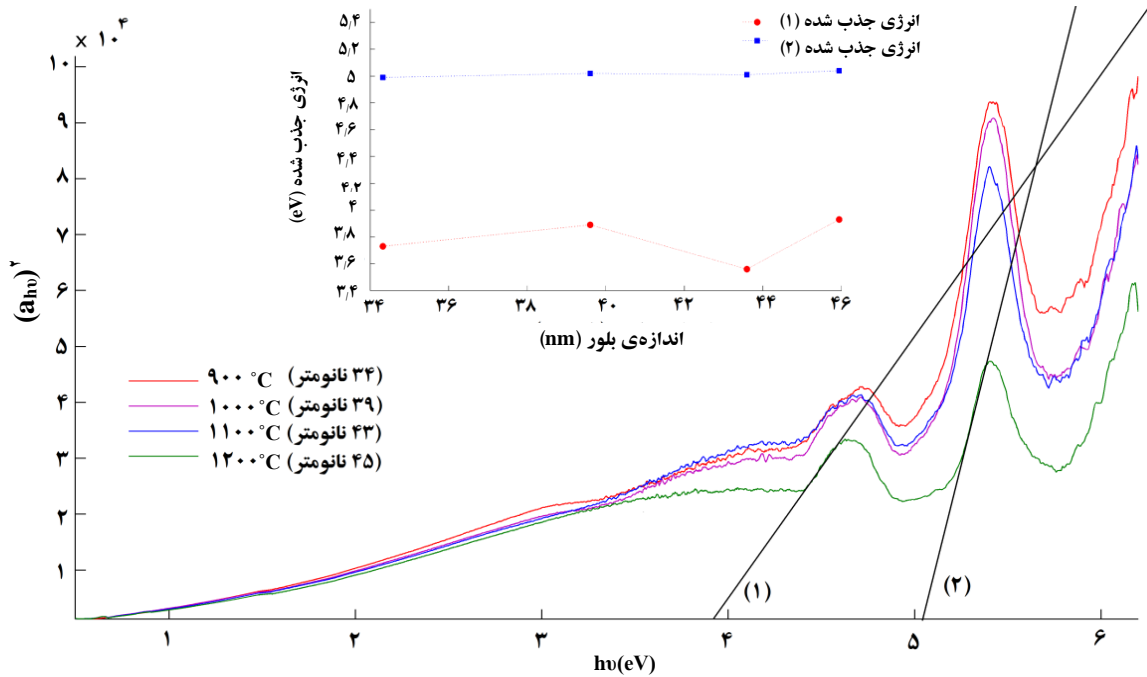
نانوبلورهای مختلف برای مقدار مشخصی از طول موج نشری در دمای اتاق اندازه گیری شد. شکل ۶ شدت بهنجار شده ی طیف برانگیختگی را برای نانوبلورهای با اندازه های مختلف که در دماهای تابکاری مختلف به دست آمده است نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، طیف برانگیختگی دارای یک قله ی پهن اصلی با شدت زیاد، و قله های با شدت کم تر به ترتیب در ۲۶۸ nm و ۳۲۰ nm است که ناشی از گذارهای f-d هستند. هم چنین اثر تغییر اندازه بر زمان فروافت نانوبلورهای متفاوت به دست آمده از روش هم رسوبی که در دماهای تابکاری مختلف تهیه شده است، برای طول موج های برانگیختگی و گسیل یکسان در دمای اتاق اندازه گیری و محاسبه شد. برای تعیین مقدار فروافت از رابطه ی $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ استفاده شد که دارای برازش بسیار خوبی با منحنی های به دست آمده است. مقدار τ بیان گر فروافت است. شکل ۷ منحنی های فروافت اندازه گیری شده در شرایط یکسان برای نانوبلورهای مختلف تهیه شده در دماهای تابکاری متفاوت را برای مقدار ثابتی از طول موج برانگیختگی و طول موج نشری نشان می دهد. هم چنین در شکل داخل کادر شکل ۷ تغییرات فروافت بر حسب اندازه ی نانوبلورهای مختلف تهیه شده، نشان داده شده است. محور افقی بیان گر اندازه ی نانوبلورها و محور عمودی فروافت محاسبه شده (بر حسب میلی ثانیه) است. همان طور که در شکل دیده می شود با کاهش اندازه ی بلورها، فروافت افزایش می یابد که می توان این گونه تفسیر کرد که با کاهش اندازه ی بلور احتمال گذارهای غیرتابشی که ناشی از اثر گذاری فونونی است کاهش می یابد. هم چنین، با افزایش اندازه ی نانوبلورها و افزایش ضریب شکست مؤثر پودر ماده ی نانو ساختاری تهیه شده در دماهای بالا، فروافت تابشی و در نهایت فروافت کل به دست آمده، کاهش می یابد [۱۳]. بررسی دقیق تر تغییرات فروافت با اندازه ی نانوبلورها نشان می دهد که فروافت تابع عکس اندازه ی نانوبلورهای گارنت به دست آمده بوده و به خوبی با تابع نمایی مرتبه ی اول برازش می شود.



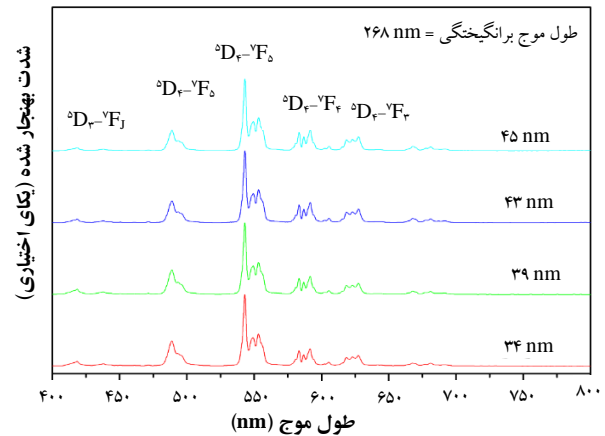
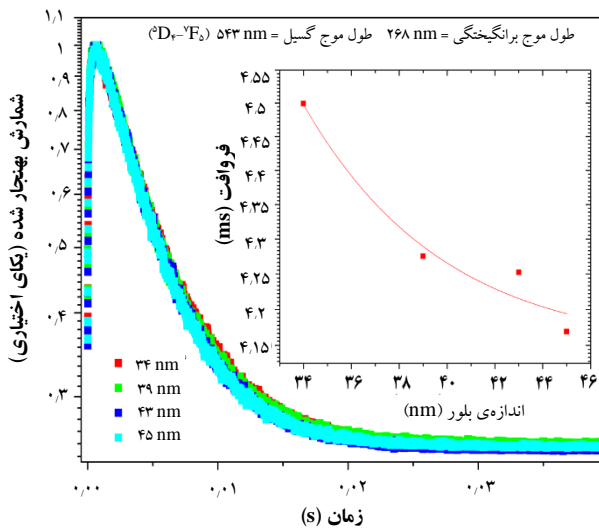
شکل ۳. طیف تبدیل فوریه ی زیرقرمز (FTIR) نانوبلورهای گارنت آلاییده شده با تربیم، تهیه شده در دماهای مختلف به روش هم رسوبی.

همان طور که شکل ۴ نشان می دهد، اثر اندازه ی نانوبلورها بر مقدارهای انرژی جذب شده، کاملاً مشهود است. همان طور که مشاهده می شود مقدار انرژی جذب شده (۲) با افزایش دما و افزایش اندازه ی نانوبلورها، با آهنگ کم افزایش می یابد در حالی که مقدار انرژی جذب شده (۱) با افزایش دما تا 1100°C کاهش می یابد و سپس با افزایش دمای بازپخت و افزایش اندازه ی نانوبلور دوباره افزایش می یابد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر اندازه ی نانوبلورهای مختلف لوتسیم آلومینیم گارنت آلاییده شده با تربیم بر ویژگی های لیانی و زمان فروافت بود. طیف نشری نانوبلورهای مختلف برای طول موج برانگیزش ثابت در دمای اتاق اندازه گیری شد. شکل ۵ طیف نشری بهنجار شده برای پودرهای نانوبلوری با اندازه های مختلف تهیه شده به روش هم رسوبی در دماهای متفاوت را نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود، طیف نشری در محدوده ی ۴۰۰ تا ۷۰۰ nm، دارای چهار گذار عمده ی مجاز ${}^6\text{D}_4 - {}^6\text{F}_6$ ، ${}^6\text{D}_4 - {}^6\text{F}_5$ ، ${}^6\text{D}_4 - {}^6\text{F}_4$ و ${}^6\text{D}_4 - {}^6\text{F}_3$ است. تغییر در اندازه ی بلورها تأثیری بر شکل کلی طیف نشری ندارد و تنها بر میزان شدت نور گسیل شده تأثیر دارد. هم چنین، طیف برانگیختگی برای

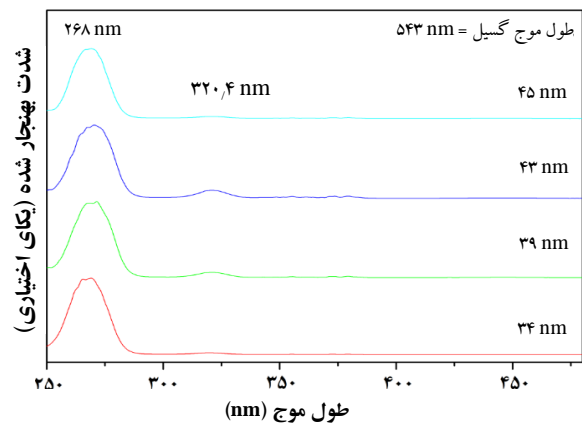


شکل ۴. طیف دیدگانی- فرابنفش و مقادیر انرژی جذب شده به دست آمده از نانوبلورهای مختلف لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم.



شکل ۵. طیف نشری بهنجار شده‌ی نانوبلورهای مختلف لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم برای طول موج برانگیختگی ۲۶۸ nm.

شکل ۷. فروافت نانوبلورهای مختلف لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم برای طول موج برانگیختگی ۲۶۸ و نشری ۵۴۳ nm.



شکل ۶. طیف برانگیختگی بهنجار شده‌ی نانوبلورهای مختلف لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم برای طول موج گسیل ۵۴۳ nm.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پودرهای نانوساختاری لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم به روش هم‌رسوبی در اندازه‌های نانوبلوری مختلف در دماهای تابکاری متفاوت ساخته شدند. ساختار و اندازه‌ی نانوبلورهای به دست آمده با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس و روش ریتولد بررسی شدند. ریزنگاره‌های میکروسکوپی الکترون عبوری (TEM) نیز ریخت و اندازه‌های آن را به خوبی توصیف

مراجع

- نمود. ساختار گارنت شکل گرفته با استفاده از طیف‌نمایی تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز (FTIR) تأیید شد. ویژگی‌های نوری ناشی از تغییر اندازه مانند اثر بر انرژی‌های جذب شده برای اندازه‌های مختلف بلورهای ساخته شده با استفاده از طیف‌نمایی دیدگانی-فرابنفش مطالعه شد. هم‌چنین، ویژگی‌های لیانی ترکیب سوسوزن گارنت آلائیده شده با تربیم بررسی شد. طیف نشری نانوبلورهای لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم نشان داد که این ترکیب لیان دارای طیف نشری مطلوب در محدوده‌ی دیدگانی نور است که در تطابق خوبی با بسیاری از لامپ‌های تکثیرکننده فوتونی تجاری موجود است. چون برای ساختن یک آشکارساز سوسوزن خوب، داشتن تطابق خوب بین طیف نوری گسیل شده از ماده‌ی سوسوزن و لوله‌ای تکثیرکننده‌ی فوتونی مناسب و در دسترس از نکته‌های کلیدی در زمینه‌ی ساخت آشکارساز سوسوزن است، نانوبلور لوتسیم آلومینیم گارنت آلائیده شده با تربیم دارای این ویژگی‌های مطلوب و برتر است. هم‌چنین، بررسی اثر اندازه بر فروافت نشان داد که تغییر اندازه‌ی بلور تأثیر چشم‌گیری بر فروافت لیانی گارنت آلائیده شده با تربیم دارد. فروافت نانوبلورهای آلائیده شده با تربیم اندازه‌گیری شده، محدوده‌ی زمانی میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد که برای کاربردهایی که تفکیک زمانی در این محدوده دارای اهمیت است (مانند مقطع‌نگاری کامپیوتری CT) می‌تواند مفید باشد [۹]. از آن جا که در تصویرگیری پزشکی مانند سی‌تی‌اسکن^(۵) داشتن تصویر با تفکیک فضایی واضح و عکس‌برداری در زمان کوتاه می‌تواند در زمینه‌ی درمان بیمار دارای اهمیت فراوان باشد، بنابراین انتخاب پارامترهای مناسب مثل داشتن اطلاع دقیق از فروافت و انتخاب الکترونیکی متناسب با ماده‌ی سوسوزن می‌تواند در کاهش هر چه بیش‌تر تابش زمینه و ارایه‌ی تصویر با کیفیت بالاتر کمک نماید. نتیجه‌های این پژوهش را می‌توان برای ساخت سرمایه‌ک‌ها یا فیلم‌های نازک در ساخت آشکارسازهای سوسوزن استفاده کرد.
- پی‌نوشت‌ها**
1. PANalytical
 2. Nicolet iS50 Thermo Scientific
 3. Cary Varian 5E
 4. Edinburgh Instruments
 5. CT Scan
- [1] H. Ogino, A. Yoshikawa, M. Nikl, A. Krasnikov, K. Kamada, T. Fukuda, Growth and scintillation properties of Pr-doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ crystals, *Journal of Crystal Growth*, 287 (2006) 335–338.
- [2] N. Wagner, B. Herden, T. Dierkes, J. Plewa, T. Justel, Towards the preparation of transparent LuAG:Nd^{3+} ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 32 (2012) 3085–3089.
- [3] L. Huili, L. Xuejian, Z. Qitu, H. Liping, Synthesis and Characterization of Cerium-Doped Lutetium Aluminum Garnet Phosphor by Nitrate-citrate Sol-Gel Combustion Process, *Journal of Rare Earths*, 25 (2007) 401–406.
- [4] M. Sugiyama, Y. Yokota, Y. Fujimoto, T. Yanagida, Y. Futami, S. Kurosawa, A. Yoshikawa, Dopant segregation in rare earth doped lutetium aluminum garnet single crystals grown by the micro-pulling down method, *Journal of Crystal Growth*, 352 (2012) 110–114.
- [5] M. Bredol, J. Micior, Preparation and characterization of nanodispersions of yttria, yttrium aluminium garnet and lutetium aluminium garnet, *Journal of Colloid and Interface Science*, 402 (2013) 27–33.
- [6] A. Katelnikovas, A. Kareiva, Low-temperature synthesis of lutetium gallium garnet (LGG) using sol-gel technique, *Materials Letters*, 62 (2008) 1655–1658.
- [7] K. Bartosiewicz, V. Babin, M. Nikl, J.A. Mares, Y. Zorenko, V. Gorbenko, Luminescence and energy transfer processes in $(\text{Lu,Tb})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ single crystalline films doped with Ce^{3+} , *Journal of Luminescence*, 173 (2016) 141-148.
- [8] A. Vondraskova, A. Beitlerova, J. Barta, V. Cuba, E. Mihokova, M. Nikl, Nanocrystalline Eu-doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ phosphor prepared by radiation Method, *Optical Materials*, 40 (2015) 102–106.
- [9] Y. Baogui, Y. Min, Z. Weiping, G. Hai, L. Lin, Luminescence Properties of Tb^{3+} -Doped LuAG Films Prepared by Pechini Sol-Gel Method, *Journal of Rare Earths*, 24 (2006) 745–748.

- [10] M. Stefanski, L. Marciniak, D. Hreniak, W. Streck, Size and temperature dependence of optical properties of $\text{Eu}^{3+}:\text{Sr}_2\text{CeO}_4$ nanocrystals for their application in luminescence thermometry, *Materials Research Bulletin*, 76 (2016) 133–139.
- [11] A.V. Ishchenko, R.F. Samigullina, T.I. Krasnenko, T.A. Onufrieva, B.V. Shulgin, Influence of grain size on luminescence properties of micro- and nanopowder $\text{Zn}_2\text{V}_2\text{O}_7$ vanadate, *Radiation Measurements*, 90 (2016) 33–37.
- [12] Kh. Rezaee Ebrahim Saraee, A.A. Khariemy, M. Khosravi, M.R. Abdi, H.Z. Zeinal, Thermoluminescence properties of nanocrystalline of $\text{BaSO}_4:\text{Dy},\text{Tb}$ irradiated with gamma rays, *Journal of Luminescence*, 137 (2013) 230–236.
- [13] S. Georgescu, E. Cotoi, A.M. Voiculescu, O. Toma, Effects of particle size on the luminescence of $\text{YVO}_4:\text{Eu}$ nanocrystals, *Romanian Reports in Physics*, 60 (2008) 947–955.