



مقاله کامل پژوهشی

سنتر الکتروشیمیایی نانوساختارهای گارنت ایتریوم آلومینیوم در حضور سورفکتانت کاتیونی: CTAB

مجتبی حسینی فرد^{۱*}، حسن گلدوز^۲، علیرضا بدیعی^۲، اصغر کاظم‌زاده^۳، کامران احمدی^۳

^۱ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

^۲ استاد، دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، پژوهشکده نیمه هادی‌ها، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

چکیده در این پژوهش، نانوساختارهای خالص گارنت ایتریوم آلومینیوم (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) طی فرایند دو مرحله‌ای و با استفاده از پیش‌ماده‌های کلریدی در محلول الکترولیت آب-تانول با نسبت مشخص سنتز شدند و تأثیر سورفکتانت کاتیونی CTAB بر اندازه ذرات و ریخت‌شناسی نانوساختارهای تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. برای سنتز YAG، لایه‌ای از فیلم هیدروکسید به روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی در سطح کاتد نشانده شد و سپس طی عملیات حرارتی، به فرآورده اکسید نهایی تبدیل شد. از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR)، گرماسنجی تفاضلی و وزن‌سنجی حرارتی (DTA-TGA) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، به ترتیب برای شناسایی فاز و ساختار بلوری ماده به دست آمده، شناسایی باندهای جذبی آن، بررسی رفتار حرارتی رسوب هیدروکسید در هنگام عملیات حرارتی و تعیین ریخت‌شناسی و اندازه ذرات پودر حاصل استفاده شد. نتایج مطالعات نشان داد که ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی، روشی عملی و بسیار کارآمد برای تهیه نانوساختارهای YAG است و افزودن سورفکتانت کاتیونی CTAB به الکترولیت به هنگام ترسیب الکتروشیمیایی می‌تواند سبب تشکیل ذرات ریزتر شود و همچنین تأثیر چشمگیری در یکنواختی و توزیع باریک‌تر اندازه ذرات دارد.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

کلیدواژه‌ها:

نانوساختار،

ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی،

الکترولیت،

فیلم هیدروکسیدی



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.237871.1101>

URL: https://www.jamt.ir/article_131755.html

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 2, (Summer 2021), 13-19

Electrochemical Synthesis of Yttrium Aluminum Garnet Nanostructures in the Presence of Cationic Surfactant: CTAB

Mojtaba Hosseinifard^{1*}, Hassan Goldooz², Alireza Badiei², Asghar Kazemzadeh³, Kamran Ahmadi³

¹ Assistant Professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center (MERC), Meshkindasht, Alborz, Iran

² Professor, School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Department of Semiconductors, Materials and Energy Research Center (MERC), Meshkindasht, Alborz, Iran

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی، تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۱

پیام نگار: m.hosseini@merc.ac.ir

Please cite this article as: Hosseinifard, M., Goldooz, H., Badiei, A. R., Kazemzadeh, A., Ahmadi, K., "Electrochemical synthesis of yttrium aluminum garnet nanostructures in the presence of cationic surfactant: CTAB", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 2, (2021), 13-19. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.237871.1101>).

2783-0829/© 2021 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Paper History:

Received: 2020-07-20

Revised in revised form: 2020-09-14

Accepted: 2021-07-27

Keywords:Nanostuctures,
Cathodic Electrodeposition,
Electrolyte,
Hydroxide Film**Abstract**

In this research, pure Yttrium Aluminum Garnet (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) nanostructures were synthesized through a two-step process by using chloride precursors in a solution of water-ethanol electrolyte with specific ratio. Also, the effect of cationic surfactant CTAB, on the size and the morphology of the prepared nanostructures were investigated. For the synthesis of YAG, a layer of hydroxide film was deposited on the surface of cathode via cathodic electrodeposition method and then, it was transformed to the final oxide product in the course of a thermal operation. X-Ray Diffraction (XRD) analysis was used for characterization of phase and crystal structure of prepared materials and also Fourier Transform Infra-Red spectroscopy (FTIR) was used for characterization of absorption bonds. Thermal behavior of deposited hydroxide during the thermal operation was studied by Differential Thermal Analysis and Thermal Gravimetric Analysis (DTA-TGA) technique. The morphology and particle size of obtained powder was determined by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of our studies showed that the cathodic electrodeposition method is a practical and very efficient method for preparation of YAG nanostructures and addition of a cationic surfactant like CTAB into the electrolyte during the electrochemical deposition can lead to the formation of smaller particles and also has an impressive effect on the homogeneity and narrower particles size distribution.


<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.237871.1101>
[URL: https://www.jamt.ir/article_131755.html](https://www.jamt.ir/article_131755.html)
۱- مقدمه

YAG خالص گزارش شده است، کاستی‌هایی مانند اندازه ذرات بزرگ، توزیع نامتناسب، تشکیل فازهای نامطلوب و غیره دارد [۶-۴]. بنابراین، برای غلبه بر معایب روش حالت جامد و تولید پودرهای حاوی ذرات ریز و با کیفیت بالا، روش‌های جدیدی گسترش یافته است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از سل-ژل [۷]، هیدروترمال [۸]، احتراق [۹]، پیرولیز پاششی [۱۰] و هم‌رسوبی [۱۱]. لازم به ذکر است که روش‌های یادشده معایبی نیز مانند نیاز به درجه‌حرارت بالا، فشار زیاد، شستشوی فراوان برای خالص‌سازی، زمان‌بر بودن و... دارند. باین وجود، به دلیل الزام عملیات حرارتی بعد از انجام این روش‌ها، تجمع ذرات، اجتناب ناپذیر است. در سال‌های اخیر، اثر سورفکتانت^۳ یا ماده فعال سطحی نیز برای به‌دست آوردن ریخت‌شناسی مناسب، اندازه ذرات ریزتر و توزیع باریک فرآورده‌های YAG، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۱۲ و ۱۳].

روش الکتروشیمیایی در میان روش‌های مختلف تولید پودر YAG، یک رویکرد جدید و کاملاً منحصربه‌فرد برای غلبه بر مشکلات روش‌های یاد شده در بالاست. از مزایای این روش می‌توان به کاهش مصرف انرژی، سادگی انجام آزمایش‌ها، امکان کنترل دقیق بر ریخت‌شناسی، انعطاف‌پذیری و روش مناسب تهیه هیدروکسیدهای فلزی برای تولید نانو ساختارها، اشاره کرد. روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی، به دلیل کنترل هدفمند روی خواص فرآورده نهایی می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر در سنتز پودر YAG مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، هنگام فرایند ترسیب الکتروشیمیایی روی سطح کاتد، هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده و سپس طی

گارنت ایتریوم آلومینیوم^۱ با فرمول شیمیایی $Y_3Al_5O_{12}$ ، ماده سنتزی با ساختار بلوری مکعبی است که معمولاً از واکنش مستقیم اکسیدهای ایتریوم و آلومینیوم در دمای بالای ۱۵۰۰ درجه سلسیوس تهیه می‌شود و به‌اختصار YAG نامیده می‌شود. علاوه بر آن، دو محصول میانی با فرمول شیمیایی $Y_4Al_2O_9$ (با ساختار مونوکلینیک) و $YAIO_3$ (با ساختار بلوری پروسکایت) که به‌اختصار YAP و YAM نامیده می‌شوند، نیز تشکیل می‌گردد. در ساختار بلوری YAG، یون‌های Y^{3+} در موقعیت‌های دوازده‌وجهی و یون‌های Al^{3+} در موقعیت‌های هشت‌وجهی و چهاروجهی قرار دارند. گارنت ایتریوم آلومینیوم (YAG) دارای انبساط حرارتی کم، پایداری شیمیایی و حرارتی زیاد، شفافیت نوری و سختی بالاست. YAG، به دلیل داشتن ویژگی ساختاری، نوری و لومینسانس^۲ مناسب، به‌عنوان یک ماده لیزر، مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲]. نکته مهم در تهیه سرامیک‌های شفاف نوری YAG و فسفرهای مبتنی بر YAG، تهیه پودرهایی با کیفیت بالا، اندازه ذرات ریز و پراکندگی خوب است. در سال‌های اخیر، به سرامیک‌های چندبلوری YAG توجه زیادی شده است و این مواد در حوزه‌های مختلفی مانند لیزرهای اشعه کاتدی، نمایشگرهای گسیل میدانی، نمایشگرهای فلورسنت خلاء و... استفاده می‌شوند [۳]. برای استفاده بهینه از YAG، دستیابی به پودر خالص حاوی ذرات کروی‌شکل با ریخت‌شناسی مناسب، توزیع اندازه باریک و اندازه ذرات متوسط ضروری است. روش‌های فیزیکی حالت جامد که تاکنون برای تهیه پودر

¹ Yttrium Aluminum Garnet² Luminescence³ Surfactant

هوای خشک قرار گرفتند. برای شناسایی ساختار بلوری پودر YAG، از آنالیز پراش پرتو ایکس^۴ (XRD) توسط دستگاه مدل Phillips PW-1800 با پرتوی تک‌فام Cu-K α با طول‌موج ۱/۵۴ آنگستروم در محدوده ۲۵، ۱۰ تا ۷۰ درجه و سرعت رویش ۵ درجه بر دقیقه، استفاده شد. برای شناسایی باندهای جذبی موجود در ترکیبات نیز از آنالیز تبدیل فوریه فروسرخ^۵ (FTIR) با دستگاه مدل RAYLEIGH WQF-510A و برای تجزیه و تحلیل حرارتی نمونه هیدروکسیدی سنتز شده، از آنالیز گرماسنجی تفاضلی و وزن‌سنجی حرارتی (DTA-TGA) دستگاه مدل TGA/DSC1-METTLER TOLEDO-STARE استفاده شد. ریخت‌شناسی، اندازه ذرات و نحوه قرار گرفتن ذرات سنتز شده در سطح نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) دستگاه مدل TESCAN VEGA Model مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

نانو پودرهای گارنت ایتريوم آلومینیوم به روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی در محلول‌های الکترولیت آب، اتانول و آب-اتانول تهیه شدند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، الگوی XRD نمونه A که در محلول الکترولیت آب تهیه شده است، دارای ناخالصی‌های Al_2O_3 و YAM است. همچنین الگوی XRD نمونه B که در محلول الکترولیت اتانول تهیه شده است، ناخالصی Al_2O_3 دارد. الگوی XRD نمونه C تهیه شده در مخلوطی از آب و اتانول با استوکیومتری مناسب، ساختار بلوری YAG مکعبی خالص را تأیید می‌کند که با شماره کارت استاندارد JCPDS card No.033-0040 مطابقت دارد [۸-۱۵]. این موضوع نشان می‌دهد که محلول الکترولیت با نسبت مشخص بین آب و اتانول، الکترولیت مناسبی برای تشکیل فاز هیدروکسید طی فرایند ترسیب الکتروشیمیایی برای تشکیل فاز خالص YAG است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاز نهایی هیچ‌گونه ناخالصی ندارد. تعیین متوسط اندازه بلور YAG خالص با استفاده از معادله شرر^۶ حدود ۵۰ نانومتر بود

عملیات حرارتی، به اکسید تبدیل می‌شوند. پودرهای خالص و چندبلوری‌های YAG قبلاً توسط گروه تحقیقاتی ما با استفاده از روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی تهیه شده‌اند [۱۷-۱۴]. در این تحقیق، اثر سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم بروماید^۱ (CTAB) بر ریخت‌شناسی و اندازه ذرات پودر YAG سنتز شده به روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی، بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

تهیه نانوپودر YAG از طریق فرایند دو مرحله‌ای و با استفاده از روش ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی از پیش ماده‌های $AlCl_3$ و $YCl_3 \cdot 6H_2O$ (شرکت آلدریچ^۲) با نسبت مولی مناسب ۰/۰۸۳-۰/۰۰۵ در سه محلول الکترولیت آب، اتانول و آب-اتانول با نسبت ۳:۱، بررسی شد. همچنین پیش از انجام فرایند ترسیب، سورفکتانت کاتیونی CTAB شرکت مرک^۳ با درصدهای وزنی مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به محلول الکترولیت انتخاب شده بهینه، افزوده شد. طی فرایند الکتروشیمیایی، یون‌های هیدروکسید در سطح کاتد تولید می‌شوند و سپس طی یک فرایند شیمیایی، کاتیون‌های فلزی موجود در محلول الکترولیت با یون‌های هیدروکسید تولید شده در سطح کاتد وارد واکنش می‌شوند و رسوب هیدروکسید $Y(OH)_n Al(OH)_n$ تشکیل می‌دهند (شکل ۱) [۱۷-۱۴]. فرایند رسوب دهی الکتروشیمیایی روی سطح کاتد از جنس فولاد زنگ نزن (استیل) 316L به ابعاد ۱ سانتی‌متر \times ۱ سانتی‌متر \times ۱ میلی‌متر که موازی بین دو آند گرافیتی قرار داده شده بود، انجام شد. برای انجام واکنش الکتروشیمیایی، از مقدار جریان مستقیم، زمان رسوب‌دهی و دمای حمام، به ترتیب ۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، ۶۰ دقیقه و ۲۵ درجه سلسیوس استفاده شد.

ورق استیل پس از عمل رسوب‌گذاری روی کاتد، چندین مرتبه با آب شستشو و در دمای محیط خشک شد. در ادامه، رسوب‌ها از بستر جدا شدند و به مدت ۴ ساعت تحت عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس در محیط

⁴ X-Ray Diffraction

⁵ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

⁶ Scherrer Equation

¹ Cetyl Trimethylammonium Bromide

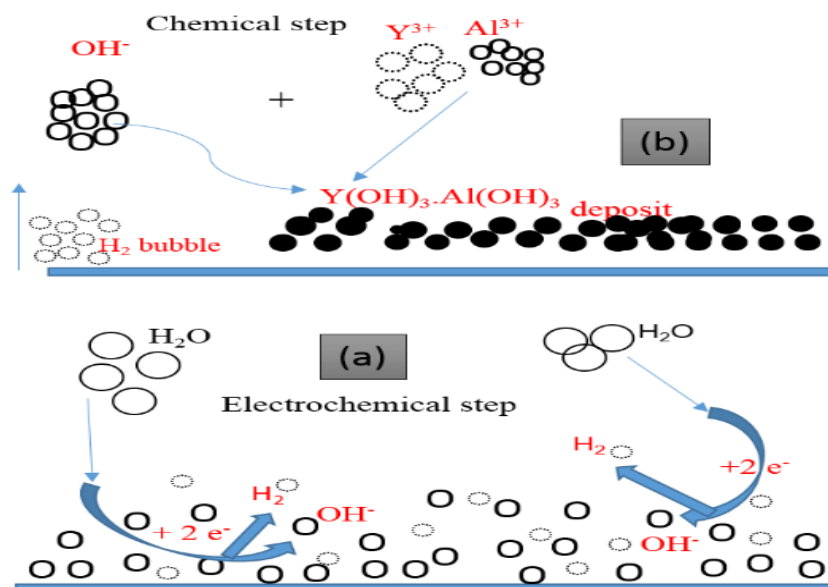
² Aldrich

³ Merck

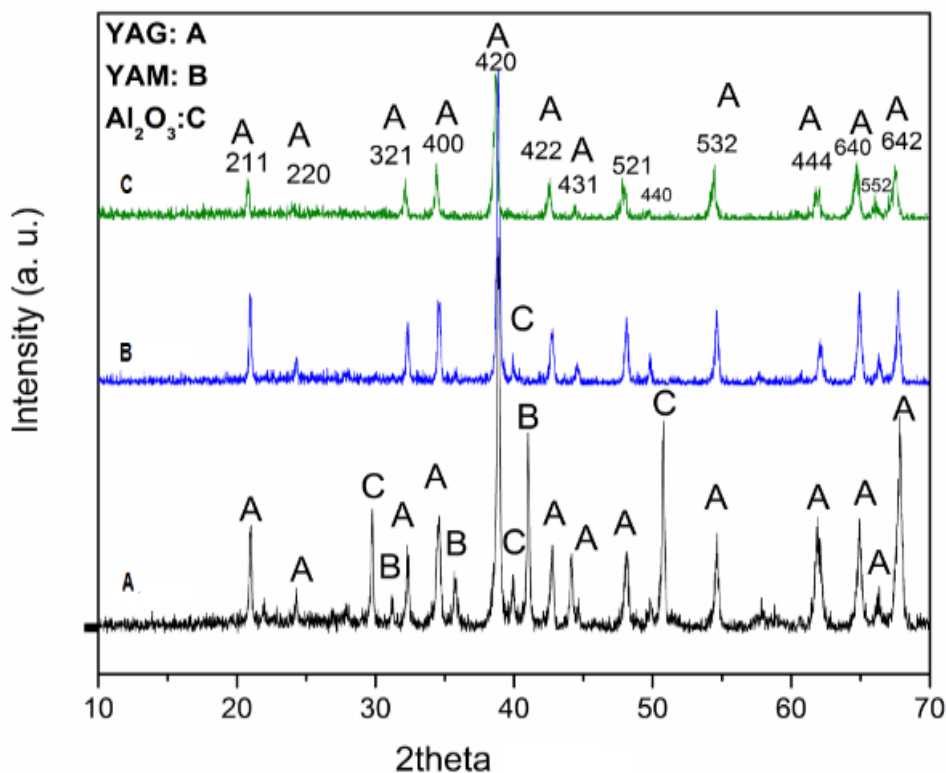
کششی Al-O است. همچنین باندهای مشاهده‌شده در نواحی ۵۷۵ و ۶۹۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی Y-O و باندهای جذبی در ناحیه ۸۰۰-۴۰۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی M-O است [۹-۱۵].

[۱۴-۱۷].

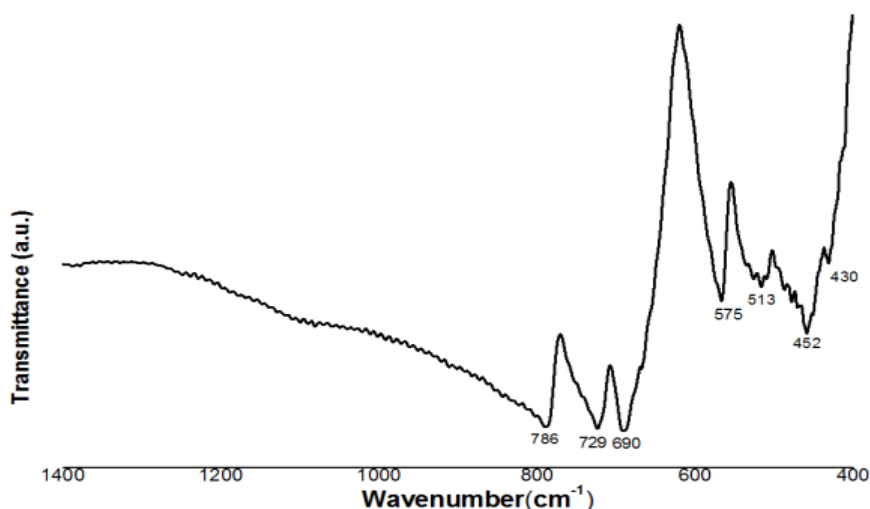
همان‌طور که در طیف FTIR نمونه سنتز شده YAG خالص (شکل ۳) مشاهده می‌شود، باندهای جذبی در نواحی ۷۲۹، ۵۱۳، ۴۵۲، ۴۳۰ و ۷۸۶ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات



شکل ۱. طرحواره ترسیب الکتروشیمیایی هیدروکسید $\text{Y(OH)}_n\text{Al(OH)}_n$



شکل ۲. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های سنتز شده YAG در الکترولیت‌های مختلف



شکل ۳. طیف تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) نمونه سنتز شده YAG خالص

دومین پیک گرماگیر واقع شده در ناحیه ۳۱۰ درجه سلسیوس، مربوط به از دست دادن آب ساختاری موجود در نمونه است [۱۸ و ۲۰]. براین اساس، منحنی TG در محدوده بین ۵۰۰-۱۰۰ درجه سلسیوس، کاهش وزن ۳۶ درصد را نشان می‌دهد که مربوط به خارج شدن مولکول‌های آب طبق واکنش (۲) است.

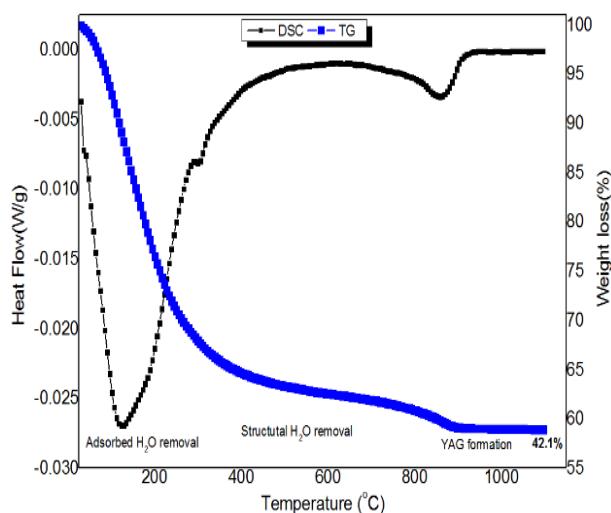


سومین پیک گرماگیر که در ناحیه ۸۵۰ درجه سلسیوس قرار دارد مربوط به تشکیل فاز خالص YAG است. بر همین اساس، منحنی TG، کاهش وزن ۴۲ درصد را در محدوده بین ۹۲۰-۵۰۰ درجه سلسیوس طبق واکنش (۳) نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۵، تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های سنتز شده YAG را در اثر افزودن سورفکتانت کاتیونی CTAB با غلظت‌های متفاوت صفر درصد وزنی (الف)، ۱۰ درصد وزنی (ب)، ۱۵ درصد وزنی (ج) و ۲۰ درصد وزنی (د) به محلول الکترولیت آب-تانول (با نسبت مشخص)، نشان می‌دهد. ابتدا کاتیون‌های فلزی موجود در محلول الکترولیت با یون‌های هیدروکسید (OH^-) که در طی واکنش الکتروشیمیایی تولید شده‌اند، در سطح کاتد واکنش داده و به شکل پیش‌ماده

در منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) (شکل ۴)، سه پیک متوالی گرماگیر مجزاً در دماهای ۱۳۵، ۳۱۰ و ۸۵۰ درجه سلسیوس، بیانگر تغییرات فیزیکی و شیمیایی در طول عملیات حرارتی این نمونه است و نحوه تبدیل هیدروکسید به اکسید را نشان می‌دهد. اولین پیک گرماگیر که در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار دارد، مربوط به از دست دادن آب سطحی است که براین اساس، منحنی وزن‌سنجی حرارتی (TG)^۲ متناسب با خارج شدن مولکول‌های آب طبق واکنش (۱)، ۵/۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد.



شکل ۴. منحنی‌های DSC-TGA نمونه سنتز شده YAG خالص

¹ Differential Scanning Calorimetry

² Thermogravimetry

۴- نتیجه گیری

نانو پودرهای خالص گارنت ایتريوم آلومینیوم با موفقیت طی فرایند ترسیب الکتروشیمیایی کاتدی، در حضور سورفکتانت کاتیونی CTAB و به دنبال آن عملیات حرارتی تهیه شدند. ساختارهای بلوری و باندهای جذبی توسط آنالیزهای XRD و FTIR شناسایی شدند. پایداری حرارتی پودر نیز توسط آنالیز DSC-TGA مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که فاز خالص YAG در محدوده دمایی ۸۵۰ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود. اثر سورفکتانت‌های کاتیونی بر ریخت‌شناسی و اندازه ذرات با آنالیز SEM بررسی شد. نتایج نشان داد که هرچه میزان (درصد وزنی) سورفکتانت در هنگام سنتز الکتروشیمیایی YAG بیشتر باشد، تأثیر آن بر اندازه ذرات، توزیع اندازه آن‌ها و همچنین ریخت‌شناسی سطح، بیشتر خواهد بود.

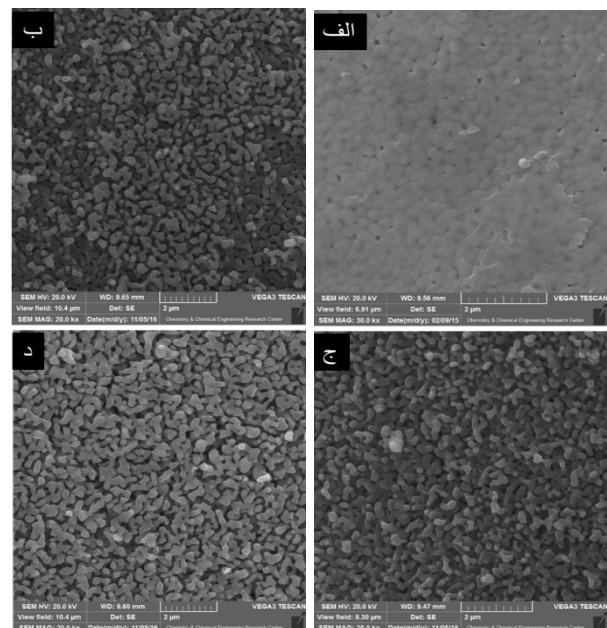
۵- سپاسگزاری

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبارات پژوهشی (پژوهانه شماره ۹۹۱۱۹۴۰) پژوهشگاه مواد و انرژی انجام شده است.

مراجع

- Ren, Y., Dong, N., Chen, F., Jaque, D., "Swift nitrogen ion irradiated waveguide lasers in Nd: YAG crystal", *Optics Express*, Vol. 19, No. 6, (2011), 5522-5527. <https://doi.org/10.1364/OE.19.005522>
- Vomacka, P., Babushkin, O., "Crystallization of $Y_3Al_5O_{12}$ from an oxynitride glass monitored by high-temperature X-ray diffractometry", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 16, No. 11, (1996), 1263-1269. [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(96\)00027-1](https://doi.org/10.1016/0955-2219(96)00027-1)
- Zhou, S., Fu, Z., Zhang, J., Zhang, S., "Spectral properties of rare-earth ions in nanocrystalline YAG: Re (Re=Ce³⁺, Pr³⁺, Tb³⁺)", *Journal of Luminescence*, Vol. 118, No. 2, (2006), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2005.08.011>
- Ruan, S. K., Zhou, J. G., Zhong, A. M., Duan, J. F., Yang, X. B., Su, M. Z., "Synthesis of $Y_3Al_5O_{12}$: Eu³⁺ phosphor by sol-gel method and its luminescence behavior", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 275, (1998), 72-75. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00276-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00276-X)
- Nassar, E. J., Santos Pereira P. F., de Oliveira Nassor, E. C., Ávila, L. R., Ciuffi, K. J., Calefi, P. S., "Nonhydrolytic sol-gel synthesis and characterization of YAG", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 7, (2007), 2244-2249. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0077-9>
- Jiao, H., Ma, Q., He, L., Liu, Z., Wu, Q., "Low temperature synthesis of YAG: Ce phosphors by LiF assisted sol-gel combustion method", *Powder Technology*, Vol. 198, No. 2, (2010), 229-232. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.11.011>
- Kutyin, A. M., Rostokina, E. Y., Gavrishchuk, E. M., Drobotenko, V. V., Plekhovich A. D., Yunin, P. A., "Kinetics and

هیدروکسیدی روی کاتد رسوب می‌کنند. سورفکتانت‌های کاتیونی افزوده شده به محلول الکترولیت نیز می‌توانند با یون‌های هیدروکسید تولید شده در سطح کاتد واکنش داده و در نتیجه همراه با پیش ماده هیدروکسیدی بر سطح کاتد رسوب کنند. فرآورده نهایی، بعد از انجام عملیات حرارتی در ۱۱۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود که متوسط اندازه ذرات ۱۰۰-۱۲۰ نانومتر است. از مقایسه بین نمونه YAG تهیه شده بدون حضور سورفکتانت (شکل ۵-الف) با نمونه‌های YAG تهیه شده در حضور سورفکتانت (شکل‌های ۵-ب تا ۵-د) مشاهده می‌شود که فرآورده‌های تولید شده با حضور سورفکتانت کاتیونی، به صورت حفره دار، همگن تر و با توزیع باریک تر اندازه ذرات به دست می‌آیند که این امر می‌تواند در نتیجه خارج شدن مولکول‌های سورفکتانت جای گرفته بین ذرات، در اثر حرارت در حین عملیات حرارتی باشد. همچنین با بررسی دقیق تر تصاویر SEM می‌توان دریافت که با افزایش میزان (درصد وزنی) سورفکتانت در هنگام سنتز نمونه‌های YAG (شکل‌های ۵-ج و ۵-د) افزون بر بزرگ تر شدن اندازه حفره‌ها (در اثر خارج شدن سورفکتانت)، اندازه ذرات نیز بزرگ تر، متوسط اندازه ذرات ۲۵۰-۱۵۰ نانومتر و توزیع اندازه آن‌ها باریک تر (همگن تر) می‌شود که این امر به خوبی اثر سورفکتانت بر ریخت‌شناسی و کیفیت فرآورده نهایی را نشان می‌دهد [۱۳-۱۲].



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های

سنتز شده YAG با غلظت‌های مختلف سورفکتانت CTAB

14. Hosseini-fard, M., Badiei, A., Ahmadi, K., "Synthesis and characterization of yttrium aluminum garnet nanostructures by cathodic electrodeposition method", *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, No. 2, (2017), 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.10.012>
15. Hosseini-fard, M., Goldooz, H., Badiei, A., Ahmadi, K., "Synthesis, characterization and luminescence properties of YAG: RE (Ce, Sm and Gd) nanophosphor by cathodic electrodeposition method", *Russian Journal of Electrochemistry*, Vol. 56, No. 2, (2020), 174-179. <https://doi.org/10.1134/S102319352001005X>
16. Hosseini-fard, M., Badiei, A., Ahmadi, K., "Cathodic electrodeposition and characterization of YAG nanostructure: Effect current density on the morphology", *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 4, No. 2, (2018), 32-36. <https://doi.org/10.30501/ACP.2018.91123>
17. Hosseini-fard, M., Goldooz, H., Badiei, A., Kazemzadeh, A., "Preparation and characterization of $Y_3Al_5O_{12}: Cr^{3+}$ nanophosphor by electrochemical technique", *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 6, No. 2, (2020), 30-34. <https://doi.org/10.30501/ACP.2020.109547>
18. Aghazadeh, M., Hosseini-fard, M., Peyrovi, M. H., Sabour, B., "Electrochemical preparation and characterization of brain-like nanostructures of Y_2O_3 ", *Journal of Rare Earths*, Vol. 31, No. 3, (2013), 281-288. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60273-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60273-7)
19. Lukowiak, A., Wiglusz, R., Maczka, M., Gluchowski, P., Strek, W., "IR and Raman spectroscopy study of YAG nanoceramics", *Chemical Physics Letters*, Vol. 494, No. 4-6, (2010), 279-283. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.06.033>
20. Khosrowpour, F., Aghazadeh, M., Arhamib, B., "Facile synthesis of vertically aligned one-dimensional (1D) $La(OH)_3$ and La_2O_3 nanorods by pulse current deposition", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 160, No. 4, (2013), D150-D155. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.050304jes/meta>
- formation mechanism of yttrium aluminum garnet from an amorphous phase prepared by the sol-gel method", *Ceramics International*, Vol. 41, No. 9, (2015), 10616-10623. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.161>
8. Xu, M. M., Zhang, Z. J., Zhu, J. J., Zhao J. T., Chen, X. Y., "Solvothermal synthesis and luminescence properties of yttrium aluminum garnet monodispersed crystallites with well-developed faces", *Journal Physical Chemistry C*, Vol. 118, No. 46, (2014), 27000-27009. <https://doi.org/10.1021/jp508507s>
9. Laishram, K., Mann, R., Malhan, N., "Single step synthesis of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanopowders by mixed fuel solution combustion approach", *Ceramics International*, Vol. 37, No. 8, (2011), 3743-3746. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.052>
10. Lee, S. H., Koo, H. Y., Lee, S. M., Kang, Y. C., "Characteristics of $Y_3Al_5O_{12}: Ce$ phosphor powders prepared by spray pyrolysis from ethylenediamine tetra acetic acid solution", *Ceramics International*, Vol. 36, No. 2, (2010), 611-615. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.09.041>
11. Ramanujam, P., Vaidhyanathan, B., Binner, J., Anshuman, A., Spacie, C., "A comparative study of the synthesis of nanocrystalline Yttrium Aluminium Garnet using sol-gel and co-precipitation methods", *Ceramics International*, Vol. 40, No. 3, (2014), 4179-4186. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.08.075>
12. Rai, P., Song, M., Song, M. -K., Song, H. -M., Kim, J. -H., Kim, Y. -S., Lee, I. -H., Yu, Y. -T., "Synthesis, growth mechanism and photoluminescence of monodispersed cubic shape Ce doped YAG nanophosphor", *Ceramics International*, Vol. 38, No. 1, (2012), 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.057>
13. Zhang, Y., Yu, H., "Synthesis of YAG powders by the co-precipitation method", *Ceramics International*, Vol. 35, No. 5, (2009), 2077-2081. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.10.002>