



اثر جانمایی وانادیوم بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانو ذرات گارنت بیسموتی

اعظم ملایی، احمد حسن پور*، محمد نیایی فر، شروین سعادت

گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۹/۳، نسخه نهایی: ۹۹/۱۱/۱۸)

چکیده: در این پژوهش، نانو ذرات گارنت ایتريوم-آهن بیسموتی با جانمایی قلع و وانادیوم با فرمول عمومی $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ ($x=0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$) با فرآیند مکانو شیمیایی تهیه شدند. اثر جانمایی وانادیوم و قلع بر ساختار بلوری نانوذرات با پراش سنج پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) و بیناب سنجی تبدیل فوریه فرو سرخ (FTIR) بررسی گردید. مغناطش اشباعی نمونه‌ها در دمای اتاق با مغناطش سنج ارتعاشی (VSM) اندازه‌گیری شد. نشان داد که با افزایش جانمایی $x=0.1$ ، مغناطش اشباع تا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. اندازه میانگین بلورک‌ها براساس داده‌های پراش پرتو ایکس در گستره ۵۳ تا ۶۸ نانومتر برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند مکانو شیمیایی؛ ذرات مغناطیسی؛ گارنت‌های جانمایی شده؛ مغناطش اشباعی.

مقدمه

طوری که گشتاورهای مغناطیسی جایگاه‌های a و d نسبت به هم پادموازی هستند [۸،۷]. از آنجا که ویژگی‌های مغناطیسی YIG ناشی از یون‌های آهن در جایگاه‌های چاروجهی و هشت وجهی است، می‌توان با جایگزین کردن کاتیون‌هایی با شعاع-های یونی و ویژگی‌های مغناطیسی متفاوت به قابلیت‌های جدیدی از این ماده دست یافت. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که جانمایی بیسموت به جای بخشی از یون‌های ایتريوم در جایگاه دوازده وجهی سبب افزایش قابل توجهی متناسب با غلظت یون بیسموت در چرخش فاراده می‌شود [۹-۱۳]. چرخش فاراده در نانو ذرات فرو مغناطیس افزون بر ضریب وردت و ضخامت ماده، به مغناطش آن نیز وابسته است [۱۰-۱۶]. ورود بیسموت سبب کاهش مغناطش می‌شود [۱۰]. برای رفع این کاستی، تاکنون پژوهش‌های بسیاری انجام شده است که بیشتر بر ثابت نگه داشتن غلظت بیسموت در جایگاه دوازده وجهی و تغییر غلظت ایتريوم و آهن در جایگاه‌های دوازده و هشت وجهی با وارد کردن یون‌های دیامغناطیس در این جایگاه‌ها متمرکز بوده‌اند [۱۵]. در این پژوهش، با حفظ مقدار

در سال‌های اخیر، ذرات نانومتری مغناطیسی گارنت ایتريوم، آهن و ایتريوم آهن آرایش شده با عناصر مختلف به دلیل داشتن ویژگی‌های مغناطیسی، اپتیکی و الکتریکی ویژه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از کاربردهای متنوع این ذرات می‌توان به استفاده آن‌ها در ابزارهای موج بری ناوارون، قطعه‌های مجتمع اپتیکی، وسایل ریز موج، حافظه‌های مغناطی نوری با کارایی بسیار بالا، چرخنده‌ها و جدا کننده‌های نوری اشاره کرد [۱-۴]. استفاده از گارنت‌ها تنها به موارد بالا محدود نمی‌شود، بلکه حوزه‌های دیگری چون صافی‌های نوری کوک پذیر، گرداننده و مولدها که همه در ناحیه‌ی ریز موج کار می‌کنند و نیز حافظه-های رقمی از نوع حوزه‌های حبابی، از این مواد بهره می‌برند [۵،۶]. ساختار بلوری گارنت ایتريوم آهن (YIG) دارای تقارن مکعبی مرکز حجمی (bcc) و وابسته به گروه فضایی $Ia3d(O_h^{10})$ است [۷]. در این ساختار، ۲۴ جایگاه دوازده وجهی (c) با یون ایتريوم، ۱۶ جایگاه هشت وجهی (a) و ۲۴ جایگاه چار وجهی (d) با یون‌های آهن اشغال می‌شوند به

برنامه‌ای در نظر گرفته نشد تا نمونه‌ها همراه با کوره آزادانه تا دمای اتاق سرد شوند. برای شناسایی فازهای بلوری موجود در نمونه‌های آسیاب شده و برشته شده در دماهای مختلف، از یک پراش سنج پرتو ایکس (Rigaku 2013 (xrd) با لامپ مس (طول موج ۰/۱۵۴ nm)، استفاده شد. به کمک رابطه شرر میانگین اندازه بلورکها محاسبه شد همچنین، اندازه ذرات با میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) مدل (TESCAN MIR A30) و ارتعاش‌ها در گستره عدد موج $150-700 \text{ cm}^{-1}$ با طیف‌سنج تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) Perkin Elmer مدل Spectrum400 بررسی شدند. منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های تک فاز نیز با مغناطیس-سنج ارتعاشی (VSM) مدل LBKFB شرکت مغناطیس کویر کاشان در گستره ۱۵۰۰۰- تا ۱۵۰۰۰ اوستد به دست آمد.

بحث و بررسی

بررسی ویژگی‌های ساختاری

الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های مقادیر جانمایی مختلف ($x = 0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$) در شکل ۱ آورده شده است. همه الگوهای پراش با کارت استاندارد JPCDS 033-0693 همخوانی دارند و تشکیل ساختار تک فاز گارنت برای هر ۵ نمونه را تایید می‌کنند. میانگین اندازه بلورکها با استفاده از رابطه شرر در گستره ۶۸-۵۳ نانومتر محاسبه شد. شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه با مقادیر جانمایی را نشان می‌دهد. چنانکه دیده می‌شود با جانمایی وانادیوم و قلع در این ترکیب ثابت شبکه افزایش می‌یابد دلیل این امر بیشتر بودن میانگین شعاع-های یونی V^{+5} (0.759 \AA) و Sn^{+4} (0.73) نسبت به Fe^{+3} (0.67 \AA) است که سبب انبساط شبکه می‌شود. شکل ۳ بیناب-های تبدیل فوریه فروسرخ دور نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با $0 \leq x < 0.2$ را نشان می‌دهد. در این گستره طول موج‌های مورد بررسی، ۹۸ مد ارتعاشی فعال در نخستین منطقه بریلوئن وجود دارد که ۱۷ مد ارتعاشی فعال آن مربوط به گارنت‌هاست. این ۱۷ مد شامل سه مد کششی نامتقارن جایگاه چاروچی (V_3)، ۳ مد خمشی نامتقارن و یک مد خمشی متقارن جایگاه هشت وجهی (V_2, V_4)، ۲ مد چرخشی و یک مد انتقالی جایگاه چاروچی (R, T)، سه مد انتقالی کاتیون‌های جایگاه هشت وجهی (T_0) و ۳ مد انتقالی کاتیون‌های جایگاه دوازده وجهی (T_d) هستند [۱۷-۱۹]. قله‌های ظاهر شده در عدد موج های ۵۶۱، ۶۰۶ و

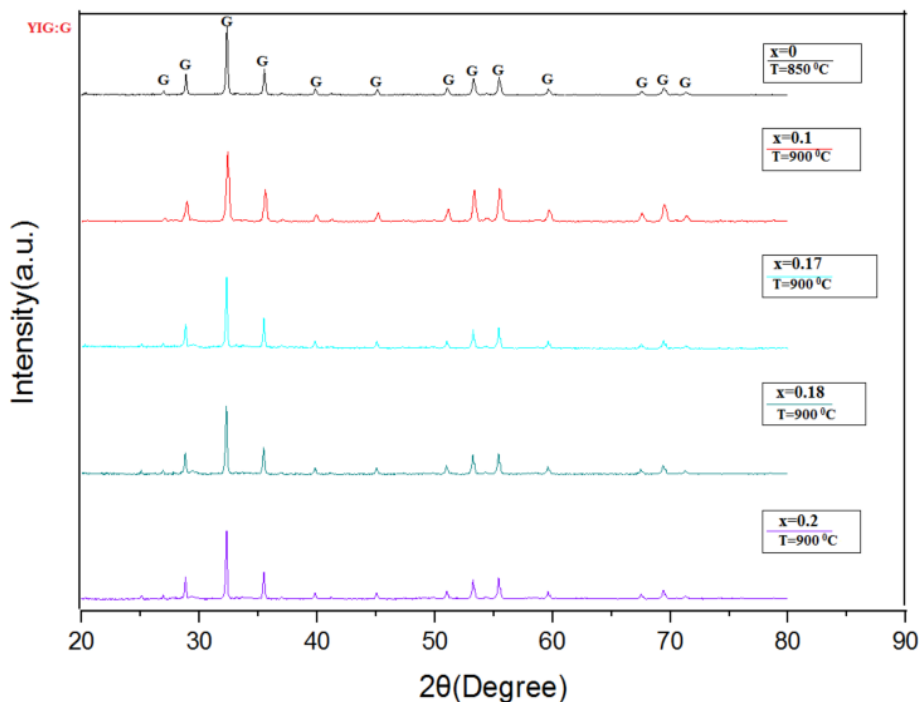
قابل توجه بیسموت در جایگاه دوازده وجهی نانو ذرات YIG و تغییر غلظت یون‌های آهن در جایگاه‌های هشت و چهار وجهی به کمک یون‌های دیامغناطیس وانادیوم و قلع (V^{+5} و Sn^{+4}) ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن با فرمول عمومی بررسی شد. نانو ذرات مورد بررسی به روش مکانو شیمیایی تهیه شدند در تهیهی ذرات نانو متری فرایند آسیاب کاری از روش‌های خشک رایج محسوب می‌شود که بسیار سازگار با محیط زیست بوده و به دور از آلاینده‌گی است. در این فرایند ذرات بسیار ریز اکسیدهای به کار رفته در کنار هم قرار گرفته و به کمک انرژی مکانیکی ناشی از برخورد گلوله‌ها با پودر واکنش شیمیایی انجام می‌گیرد. به این ترتیب مقداری از فازهای میانی طی این فرایند تشکیل می‌شود که خود سبب کاهش دمای تشکیل فاز اصلی و رشد بلورکها در مقیاس نانومتری می‌گردد.

روش ساخت

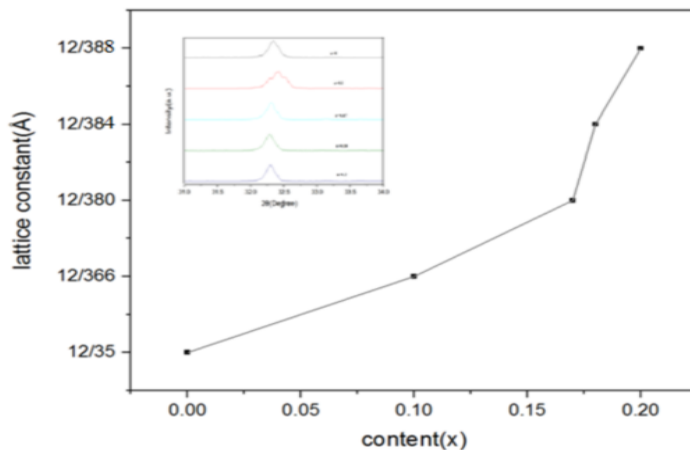
برای تهیه نمونه‌ها از مواد اولیه آزمایشگاهی شامل Y_2O_3 و $Fe_2O_3, Bi_2O_3, V_2O_5, SnO_2$ از شرکت مرک با درجه‌ی خلوص بیش از ۹۹/۸ درصد استفاده شد. برای تهیه پودرهای نانومتری به روش مکانوشیمیایی، هر بار مقدار ۴ گرم از مواد خام براساس عنصرسنجی $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ برای مقادیر $x = 0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$ توزین شدند. عملیات مخلوط‌سازی و آسیاب کاری توسط یک دستگاه آسیاب سیاره‌ای فریچ (P6) در محفظه استیل ۸۰ میلی لیتری و با گلوله‌های استیل در اندازه‌های مختلف برای زمان‌ها و با دوره‌های گوناگون انجام گرفت. با روش آزمون خطا نسبت گلوله به مواد ۱۰ به ۱ است و دور مناسب ۴۵۰ دور در دقیقه به دست آمد. برای جبران آهن وارد شده از سایش گلوله‌ها، در هر بار توزین مقدار ۱۰٪ از وزن اکسید آهن نسبت به مقدار عنصرسنجی کمتر در نظر گرفته شد. سپس برای پودرهای آسیاب شده در دماها و زمان‌های مختلف فرایند گرمایی انجام شد. براساس روش آزمون و خطا در فرایندهای خردایش، گرمایش و فازیابی گوناگون، بیشینه مقدار وانادیومی که می‌تواند در این ساختار وارد شود، $X = 0.2$ به دست آمد. به منظور کامل شدن فاز گارنت، برای پودر آسیاب شده عملیات گرمایی مناسب انجام می‌شود [۱۶، ۱۵]. برای عملیات گرمایشی از یک کوره الکتریکی خودکار و قابل برنامه‌ریزی استفاده شد. سرانجام آهنگ گرمایش برای همه نمونه‌ها $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، دمای برشتن 900°C و زمان ماندگاری ۴ ساعت انتخاب شد. برای سرد شدن

جابجایی و همچنین پهن شدگی شده که دلیل آن وارد شدن یون بزرگتر قلع در آن و در نتیجه انبساط شبکه است. قله‌های در 333.26 cm^{-1} را می‌توان به مد ارتعاشی T_0 نسبت داد [۲۱،۱۹]. در نتیجه این طیف‌ها در کل نشان می‌دهند که در همه‌ی نمونه‌ها فاز گارنت بدون ناخالصی تشکیل شده و افزون بر آن، جابجایی و پهن شدگی قله‌های جذب نشانگر وارد شدن افزودنی‌ها در ساختار بلوری گارنت است.

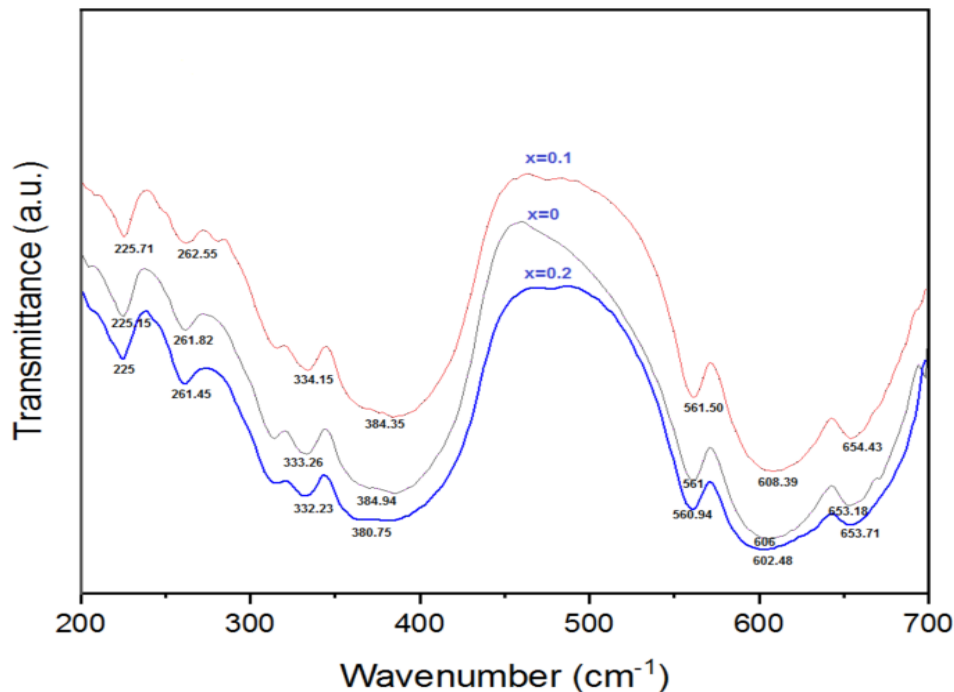
653.18 cm^{-1} مربوط به مد ارتعاشی v_3 در $\text{Y}_{2.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ هستند [۲۰]. جابجایی این قله‌ها به سمت عدد موج‌های کمتر در نمونه‌های جانمایی شده $(x = 0)$ نشانگر انبساط این جایگاه به خاطر جانمایی یون وانادیوم است. قله‌های بین ۳۸۴ تا 476 cm^{-1} مربوط به ارتعاش‌های جایگاه هشت وجهی هستند. چنانکه در شکل دیده می‌شود، این جایگاه نیز در نمونه‌های جانمایی شده $(x \neq 0)$ مانند جایگاه چاروجهی دستخوش



شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های $\text{Y}_{2.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Fe}_{2-2x}\text{Sn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{V}_x\text{O}_{12}$ با مقادیر جانمایی $x = 0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$



شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه نانو ذرات $\text{Y}_{2.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Fe}_{2-2x}\text{Sn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{V}_x\text{O}_{12}$ با مقدار جانمایی (x).



شکل ۳. طیف‌های تبدیل فوریه فرسرخ دور نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با $0 \leq x < 0.2$.

یون مغناطیسی آهن جای خود را به یک یون دیامغناطیس وانادیوم می‌دهد [۲۳]. از آنجا که گشتاورهای مغناطیسی یون-های جایگاه‌های هشت و چار وجهی پادموازی هستند، مغناطش کل افزایش می‌یابد. چنان که از نمودار پیداست این افزایش تا مقدار $x = 0.1$ قابل ملاحظه است ولی با افزایش مقدار ناخالصی کمی کاهش می‌یابد. این کاهش نسبی را می‌توان به کج‌شدگی اسپینی در جایگاه چاروجهی نسبت داد. می‌دانیم که در گارنت‌ها موازی بودن اسپین‌ها در جایگاه چاروجهی بستگی به نظم اسپینی و پیوند ابرتبادلی جایگاه هشت وجهی دارد و با رقیق شدن این جایگاه، زاویه $Fe-O-Fe$ تغییر کرده و این امر منجر به کج‌شدگی اسپینی و در نتیجه کاهش مغناطش می‌گردد [۲۴-۲۷]؛ با وارد شدن قلع در جایگاه هشت‌وجهی و حذف تعدادی از یون‌های آهن، شدت میدان این جایگاه در جایگاه چاروجهی که سبب ردیف شدن گشتاورهای مغناطیسی این جایگاه می‌شود کم شده و این امر سبب کج‌شدگی اسپینی در این جایگاه و در نتیجه کاهش مغناطش کل می‌شود. چنانکه دیده می‌شود با ورود یون‌های ناخالصی تا $x = 0.1$ ، تنها تفاوت تعداد یون‌های مغناطیسی دو جایگاه غالب است که سبب افزایش گشتاورهای مغناطیسی در جایگاه چاروجهی و در نتیجه افزایش مغناطش نمونه‌ی کپه‌ای

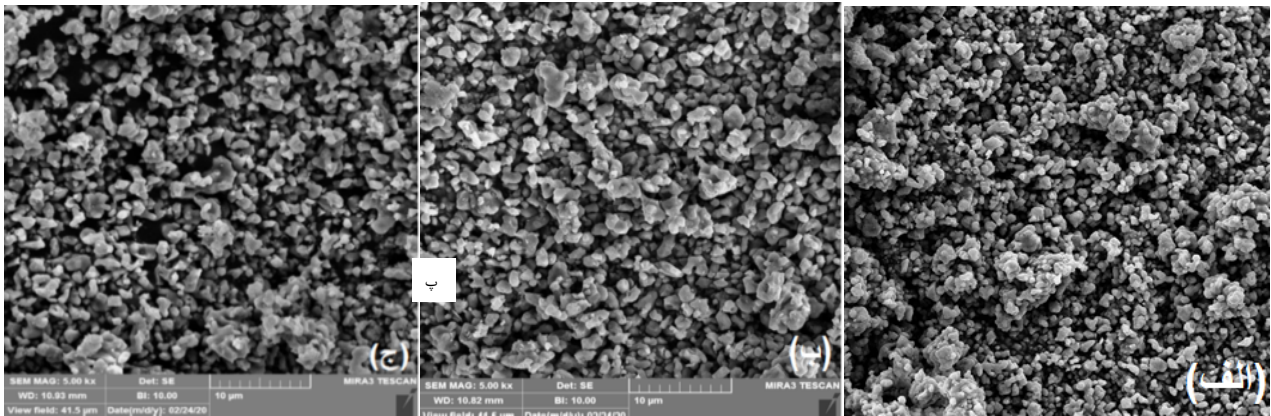
در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های با $x=0, 0.1, 0.2$ آورده شده است چنانکه دیده می‌شود، توزیع دانه‌ها تقریباً یکنواخت و شکل آن‌ها تقریباً مکعبی است. البته، اندازه‌ی دانه‌ها و تخلخل در نمونه‌های مختلف متفاوت است به طوری که با افزایش وانادیوم و قلع اندازه‌ی دانه‌ها افزایش می‌یابد [۲۲].

مشخصه‌یابی مغناطیسی

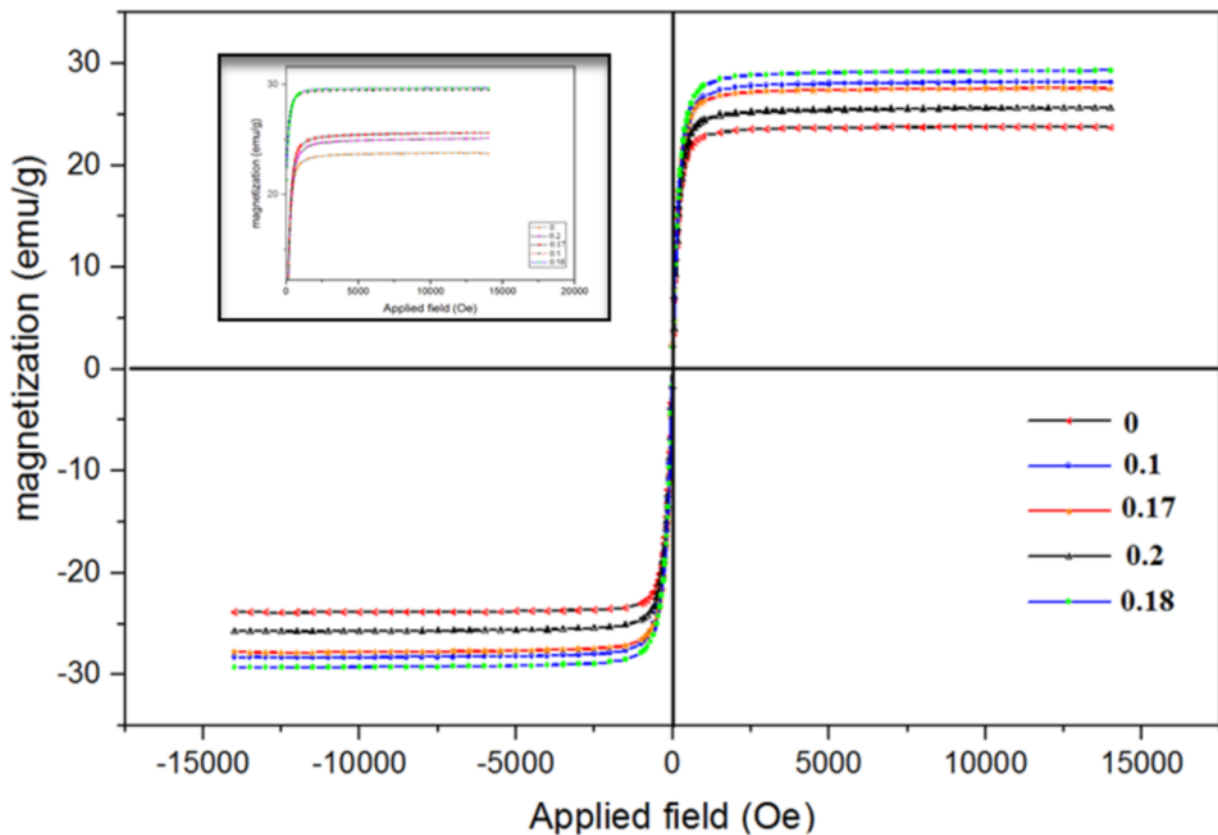
منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_2$ $2xSn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با مقادیر جانشانی مختلف در دمای اتاق در شکل ۵ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود همگی نمونه‌ها در میدان‌های کمتر از ۲۵۰۰ اورستد به اشباع رسیده‌اند که نشانگر آن است که همگی نمونه‌ها فریت نرم با پسماند بسیار ناچیز هستند. در شکل ۶ تغییرات مغناطش اشباع (M_s) نمونه‌ها با مقادیر جانشانی آورده شده است. دیده می‌شود که مقدار مغناطش اشباع نمونه‌ها با افزایش مقدار جانشانی یون‌های وانادیوم و قلع افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به وارد شدن یون‌های دیامغناطیس قلع در جایگاه هشت‌وجهی و وانادیوم در جایگاه چار وجهی نسبت داد، با وارد شدن یون غیر مغناطیسی قلع در جایگاه هشت وجهی، دو یون مغناطیسی آهن حذف می‌شوند، در حالی که در جایگاه چاروجهی، یک

ممکن است به دلیل مهاجرت بخشی از یون‌های وانادیوم از جایگاه چاروجهی به جایگاه هشت وجهی و جایگزینی آن با آهن سه ظرفیتی در جایگاه چاروجهی باشد که این موضوع نیاز به بررسی بیشتر و تهیه‌ی طیف موسبائر دارد.

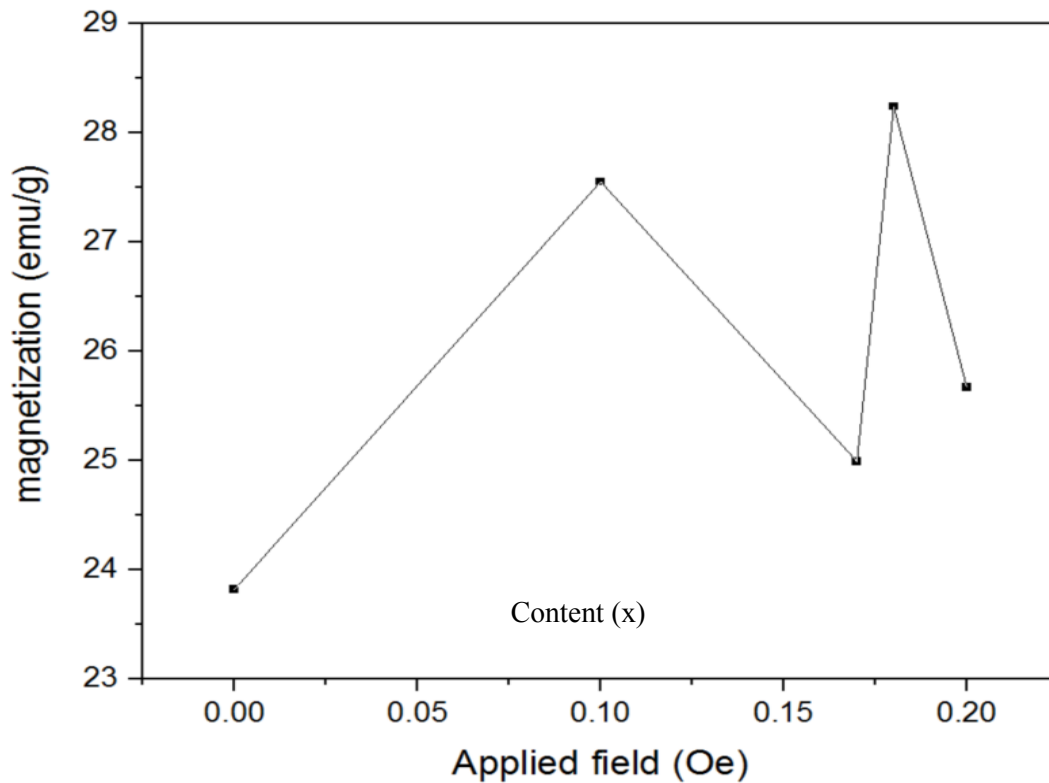
می‌شود. این در حالی است که با ورود ناخالصی بیشتر پدیده‌ی دوم یعنی کج شدگی اسپینی غالب شده و مغناطش کاهش می‌یابد. البته، چنان که پیداست همواره مقدار مغناطش در همه نمونه‌ها بیشتر از مقدار مغناطش نمونه با $x = 0$ است [۲۴-۲۷]. افزایش نسبی مغناطش در نمونه با $x = 0.18$



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ برای (الف) $x = 0$ ، (ب) $x = 0.1$ ، (پ) $x = 0.2$



شکل ۵ منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با مقادیر جانمایی $x = 0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$



شکل ۶ منحنی تغییرات مغناطش اشباع نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با مقدار جانشانی (x).

برداشت

در این پژوهش، نمونه‌های $Y_{2.5}Bi_{0.5}Fe_{2-2x}Sn_xFe_{3-x}V_xO_{12}$ با مقادیر جانشانی $x=0, 0.1, 0.17, 0.18, 0.2$ به روش مکانو شیمیایی تهیه شدند و تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس آنها ساختار تک فاز گارنت را تایید کرد. ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها با بررسی طیف‌های FTIR دور بررسی شد و مدهای ارتعاشی مربوط به جایگاه‌های چاروجهی، هشت‌وجهی و جایگاه دوازده‌وجهی دیده شدند. جابه جایی در جایگاه نوارهای جذب نشان دهنده جانشانی یون وانادیوم و قلع در ساختار گارنت بود. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که مغناطش اشباع نمونه‌ها با جانشانی وانادیوم و قلع تا $x=0.1$ افزایش و سپس در $x=0.2$ کاهش می‌یابد.

قدردانی

از امکانات آزمایشگاهی ارائه شده توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Ristic M., Nowik I., Popovic S., Felner I., Music S., "Influence of synthesis procedure on the YIG formation", *Materials Letters* 57(2003)2584-2590.
- [2] Ravi B.G. Guo X. Z., Yan Q.Y., Gambino R.J., Sampath S., Parise J.B., "Evolution and magnetic properties of Al substituted yttrium iron garnet nanopowders and plasma-sprayed coatings" *Surface and coatings Technology* 201(2007) 7597-7605.
- [3] Wang C. C., Yu W. T., "Synthesis of yttrium iron garnet using polymer-metal chelate precursor", *Journal of Colloid and interface Science* 306(2007) 241-247.
- [4] Lee J. W., Oh J. H., "Magneto-optical properties of Bi-YIG nanoparticles dispersed in the organic binder", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 272(2004)2230-2232.
- [5] Di Biccari A., "Sol-gel processing of magneto-optical films," M.S. thesis, Materials Science &

preparation, *Structural and magnetic properties of Ca-Zr doped Bi-YIG*", Journal of Materials Research Bulletin 48(2013) 2892-2895.

[17] Hofmeister A.M., Campbell K.R., "Infrared spectroscopy of yttrium aluminum, yttrium gallium and yttrium iron garnets", Journal of Applied phys. 72(1992) 638-646.

[18] Beregi E., period E., "IR spectroscopic investigation of the garnet materials used in the microwave electronics", Chem Eng. 30(1986)235-246.

[19] Hofmeister A. M., "Infrared microscopy in earth science, in: H.J. Humecki (Ed.), *practical Guide to Infrared Microspectroscopy*", Marcel Dekker, New York, 1995.

[20] Pormehr A., Niyafar M., Hassanpour A., "Investigation of structural properties of Yttrium Iron Garnet substituted by Antimony fabricated via Sol-gel method", Iranian Journal of crystallography and Mineralogy. 26(2019)1027-1036. Doi:10.29252/ijcm.2604.1027.

[21] Niyafar M., Mohammad pour H., Behmanesh A., "correlation of structural distortion with magnetic properties of Pr-YIG system", Journal of Alloys and compounds. 683(2016) 495-500.

[22] *American Mineralogist, Volume 101, pages 907-918, 2016*" Effects of Zr-substitution on microstructure and properties of YCaVIG ferrites, J.M.M. Journal of magnetic and magnetic material. 324,(2012) 924.

[23] James J. Papike, Steven B. Simon, Paul V. Burger, Aaron S. Bell, Charles K. Shearer, James M. Karner, "Chromium, vanadium, and titanium valence systematics in Solar System pyroxene as a recorder of oxygen fugacity", planetary provenance, and processes" *American Mineralogist, Volume 101, pages 907-918, 2016*.

[24] Huang Yin-Yin, Jian Yang, Tai Qiv, Jia-Qian, etc, "Effects of Zr-substitution on microstructure and properties of YCaVIG ferrites", Journal of magnetism and magnetic materials, VO:324, (2012)934-938.

[25] Imaddin A., Al-Omari, Ralph skomski, David J. Sellmyer, "Magnetic properties of Y3-2x Ca2x Fe5-x Vx O12 Garnets", journal of Advances in materials and chemistry, Vo:02,(2012)116-120.

Engineering Department, Blacksburg, Va, USA, 2002.

[6] Shea L.E., Mckittrick J., Lopes O.A., Sluzky E., "Synthesis of red-emitting, small particle size luminescent oxides using an optimized combustion process", Journal of the American Ceramic Society 79(12)(1996)3257-3265.

[7] Menzer G., "Die kristall structure der garnet", z. kristalloger 69(1928)300-396.

[8] Xiaofeng Guo, Amir H., Tavakoli Steve Sutton, Ravi Kukudapu, Liang Qi, Antonio Lanzirotti, Matt Newvill, Mark Ast, Alexandra Navortsky, "Cerium substitution in yttrium iron garnets, valence state, structure, and energetics", Journal of chemistry of materials(2013), ppA-K

[9] Wittekoek S., Popma T.J.A., Robertson J.M., Bongers P.F., "Magneto-optic spectra and the dielectric tensor elements of bismuth-substituted iron garnets at photon energies between 2.2-5.2 eV", physical Review B 12(1975)2777-2788.

[10] Dzibro D., "Optical and Magneto-optical properties of rare earth substituted iron Garnets", 1th edn, Stockholm: published by Stockholm University, (2006)81.

[11] Kahl S., et al., "Structure microstructure and magneto-optical properties of laser deposited Bi3 Fe5 O12/Gd3 Ga5 O12(111) films", Journal of Applied physics, 91(2002)9556-9560.

[12] Bloembergen N., "Radition damping in magnetic resonance", Journal of physics Review, vol:95 (1954) 8-12.

[13] Oikawa T., et al., "First-principales study of spin-orbit interaction in bismuth iron garnet", Journal of physics Soc Jpn, 74(2003)401-404.

[14] Xu H., Yang H., Xu W., Yu L., "Magnetic properties of Bi-doped Y3 Fe5 O12 nanoparticles", current applied Physics 8(2008)1-5.

[15] Hasanpour A., Mozaffaria M., Amighiana J., Richertd H., Lorenzd A., Lindnerd M., Gornertd P., Heegne H., "Preparation and magneto-optical properties of BiY2Fe5O12 organic nanocomposite films", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 317 (2007) 41-45.

[16] Hasanpour A., Niyafar M., Faridniya N., Amighian J., "The Effect of Ca-Zr mole ratio on

evolution of $Y_{3-x}(Ca\ Zr)_xFe_{5-x}O_{12}$ by the sol-gel method", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 395(2015)73-80.

[26] Kodama R.H., "*Magnetic nanoparticles*", J.Magn. Magn.Mater.200 (1999) 359-372.

[27] Lili Wang., Zhigao Huang, Huiqin Zhang, Ruibing Yu., "*Phase and magnetic properties*