

خواص ساختاری و مغناطیسی ذرات گارنت ایتريوم آهن با جانشانی یوروپيوم سنتز شده به روش سل - ژل

سیده سوسن سادات احمدی^۱، محمد نیایی فر^{۲*}، احمد حسن پور^۲

۱- گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

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

(دریافت مقاله: ۹۵/۳/۳، نسخه نهایی: ۹۵/۶/۱۵)

چکیده: در این پژوهش پودرهای بس ریز گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با یوروپيوم با ترکیب $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ و مقادیر جانشانی $(x = 0.1, 0.2, 0.4)$ به روش سل ژل تهیه شدند. تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) ساختار تک فاز گارنت را در همه نمونه ها تایید کرد. با استفاده از آنالیزهای Far-FTIR و Raman، تشکیل فاز گارنت در همه نمونه ها مورد تأیید قرار گرفت. چرخه های پسماند بدست آمده از مغناطیس سنج نمونه ای ارتعاشی (VSM) نشان دهنده کاهش مغناطش اشباع با افزایش جانشانی یوروپيوم است. این تغییرات با استفاده از نظریه نیل و شکافتگی حاصل از کج شدگی اسپینی در هر یک از زیر شبکه های مغناطیسی پس از جانشانی یون Eu^{3+} در ساختار گارنت ایتريوم آهن توضیح داده شد.

واژه های کلیدی: سل ژل، گارنت ایتريوم آهن، یوروپيوم، بیناب سنج رامن، مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی.

مقدمه

در سال های اخیر ذرات مغناطیسی گارنت ایتريوم آهن و ایتريوم آهن آرایش شده با عناصر مختلف به دلیل داشتن ویژگی های مغناطیسی، اپتیکی و الکترونیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. از کاربردهای متنوع این ذرات می توان به استفاده آنها در ابزارهای موج بری ناوارون، قطعات مجتمع اپتیکی، وسایل میکروموج، حافظه های مغناطونوری با کارایی های بسیار بالا، چرخنده ها و جداکننده ها اشاره کرد [۱-۴]. استفاده از گارنت ها تنها به موارد بالا محدود نمی شود بلکه حوزه های دیگری همچون فیلترهای نوری کوک پذیر، سیرکولاتورها و ژیراتورها که همه در ناحیه میکروموج کار می کنند و نیز حافظه های رقمی از نوع حوزه های حبابی، از این مواد بهره می جویند [۵، ۶]. ساختار بلوری گارنت ایتريوم آهن (YIG) دارای تقارن مکعبی مرکز حجمی (bcc) و به گروه فضایی

$Ia\bar{3}d(O_h'')$ وابسته است [۷]. در این ساختار ۲۴ جایگاه دوازده وجهی $\{c\}$ ، ۱۶ جایگاه هشت وجهی $[a]$ و ۲۴ جایگاه چهاروجهی $\{d\}$ وجود دارند که جایگاه های دوازده وجهی به وسیله یون ایتريوم و جایگاه های چهاروجهی $\{d\}$ و هشت وجهی $[a]$ توسط یون های آهن اشغال شده اند بطوریکه گشتاورهای مغناطیسی جایگاه های a و d به شکل پادموازی نسبت به یکدیگر سمته گیری می کنند که در شکل ۱ نشان داده شده اند [۷، ۸]. با توجه به اینکه ویژگی های مغناطیسی در YIG ناشی از یون های آهن در جایگاه چهاروجهی و هشت وجهی است، می توان با جایگزین کردن کاتیون هایی با شعاع یونی و یا ویژگی ها مغناطیسی متفاوت به قابلیت های جدیدی از این ماده دست یافت. به نظر پژوهندگان تاکنون کاری پژوهشی برپایه جانشانی یون یوروپيوم در ساختار گارنت ایتريوم آهن گزارش نشده است. لذا بررسی ویژگی های ساختاری و

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۵۱۰۵۵۲۹۳، پست الکترونیکی: Md.niyaifar@gmail.com

شدند [۹].

$$D = 0.9\lambda/\beta\cos\theta \quad (۱)$$

در رابطه بالا D بر حسب نانو متر، λ طول موج پرتو ایکس $\text{Cu-K}\alpha$ (برابر با 0.15406 نانو متر)، θ زاویه براگ، β پهنای قله در نیم شدت بیشینه (بر حسب رادیان) است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$\beta = \sqrt{B_M^2 - B_s^2} \quad (۲)$$

که در آن B_s پهنای قله پراش وابسته به نمونه‌ای با اندازه‌ی بلورک‌های بزرگتر از یک میکرون که از واگرایی پرتو ایکس به دست می‌آید که پهن‌شدگی دستگاهی خوانده می‌شود. B_M نیم قله‌ی پراش ماده‌ی اصلی است که بره‌ی مده از ریز بودن ذرات و واگرایی پرتو ایکس XRD است.

اندازه ثابت شبکه نمونه‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$a = \frac{\lambda\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2\sin\theta} \quad (۳)$$

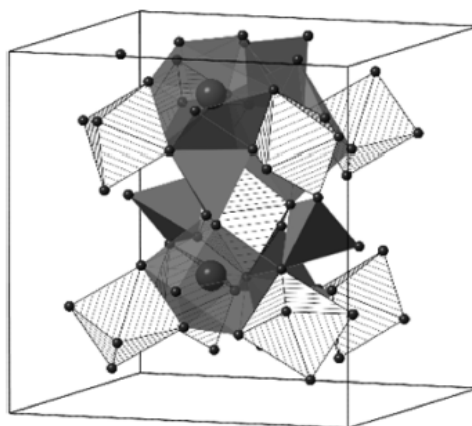
که در آن a بر حسب آنگستروم، λ طول موج پرتو ایکس $\text{Cu-K}\alpha$ (برابر با 0.15406 نانومتر)، θ زاویه براگ در قله‌ی (۴۲۰) است.

ارتعاش‌ها در گستره‌ی عدد موج $150-700\text{ cm}^{-1}$ با استفاده از Far-FTIR (Perkin Elmer) مدل Spectrum 400 بدست آمدند. بیناب‌های رامان نمونه‌ها در گستره‌ی $100-1000\text{ cm}^{-1}$ با استفاده از بیناب‌سنج رامان مدل Almega Thermo Nicolet Dispersive تهیه شدند. منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌ها با مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) ساخت شرکت Lake shore مدل 7400 مورد بررسی قرار گرفتند.

مغناطیسی YIG آلائیده شده با Eu مطلوب به نظر می‌رسد. در این پژوهش عنصر Y^{3+} با عنصر خاکی نادر Eu^{3+} جانشانی شده و ذرات $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ به روش سل-ژل تهیه شدند. Eu^{3+} یک یون مغناطیسی (پارامغناطیسی) است، بنابراین ویژگی‌های مغناطیسی YIG آلائیده شده با Eu تغییر خواهد کرد. به همین دلیل ویژگی‌ها ساختاری و مغناطیسی ذرات $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ در این پژوهش بررسی شدند.

روش ساخت

ذرات گارنت ایتريوم آهن جانشین شده با یورپیوم با ترکیب $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ و مقادیر جانشانی ($x=0.0, 1.0, 2.0$) به روش سل ژل تهیه شدند. برای تهیه‌ی محلول نیم مولار مواد اولیه‌ی شامل نمک‌های نیترات ایتريوم $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Aldrich 99.9%)، نیترات آهن $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Aldrich 99.99%) و نیترات یورپیوم $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Aldrich 99.9%) طبق روابط موازنه عنصری، در 100 ml آب یون‌دایی شده حل شدند. سپس محلول اسید سیتريک $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ به این محلول اضافه شد. محلول سیترات به نیترات با نسبت ۱:۳ تنظیم شد. سپس برای دستیابی به $\text{pH} = 2$ ، آمونیاک به آن اضافه شد. محلول نهایی تا دمای 85°C گرم‌ا داده شد تا سل تولید شده به ژل تبدیل شود. سپس ژل بدست آمده در دمای 115°C به مدت ۴۸ ساعت در آون کاملاً خشک شد. در نهایت پودر خشک شده به منظور گرمادهی در دمای 1000°C به مدت ۳ ساعت در کوره الکتریکی قرار گرفت. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از Rigaku 2013 تهیه شدند. از پهنای قله (۴۲۰) قله‌های XRD و از رابطه دبی-شرر اندازه‌ی بلورک‌ها محاسبه



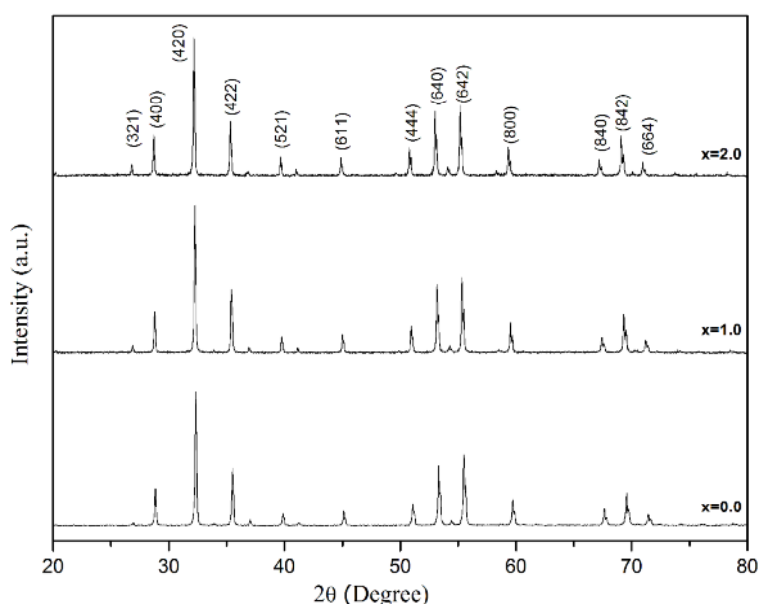
شکل ۱ ساختار مکعبی گارنت ایتريوم آهن. چند وجهی‌های مت جایگاه دوازده‌وجهی، چند وجهی‌ها نشان داده شده با خطوط تیره جایگاه هشت-وجهی و چندوجهی‌های خاکستری رنگ جایگاه چهاروجهی هستند.

بحث و بررسی

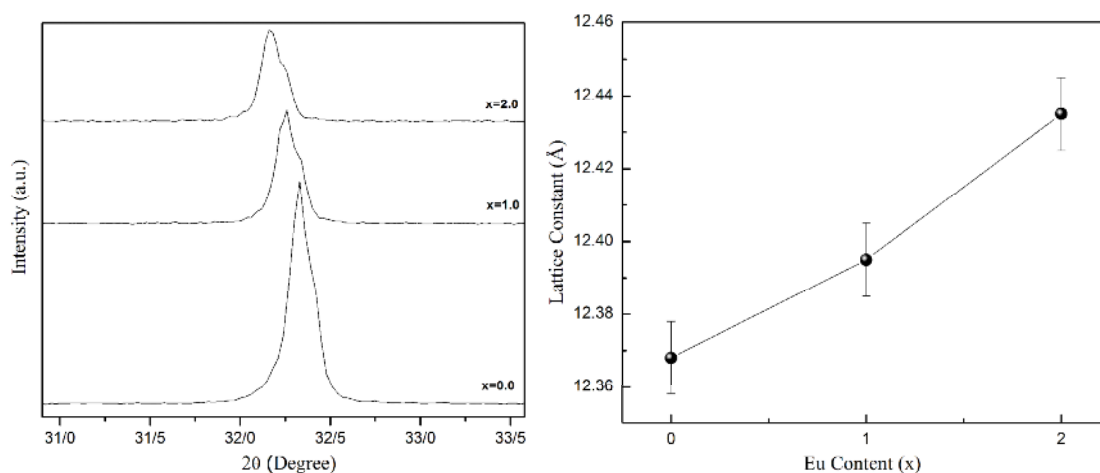
بررسی ویژگی‌های ساختاری

الگوهای پراش پرتو ایکس ذرات گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با یوروپيوم $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ و مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$) در شکل ۲ آورده شده‌اند. همه الگوهای پراش با کارت استاندارد (JPCDS ۰۳۳-۰۶۹۳) همخوانی داشته‌اند و تشکیل ساختار تک فاز گارنت برای هر سه نمونه را تایید می‌کنند. میانگین اندازه بلورک‌ها با استفاده از رابطه دبی-شرر در گستره ۵۳-۵۱ نانومتر محاسبه شد. اندازه ریز بلورک‌ها نزدیک به هم بوده و تغییرات چندانی در

آنها مشاهده نمی‌شود. از آنجا که افزایش دما مؤثرترین عامل در افزایش اندازه ریز بلورک‌ها و افزایش بلوری شدن است، در شرایط دمایی یکسان تغییرات زیادی در اندازه ریز بلورک‌ها مشاهده نمی‌شود [۱۱]. تغییرات ثابت شبکه بر حسب مقادیر جانشانی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با جانشانی یوروپيوم در این ترکیب ثابت شبکه افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل بزرگتر بودن شعاع یونی Eu^{3+} ($1.075 \text{ \AA}$) در مقایسه با شعاع یونی Y^{3+} ($1.016 \text{ \AA}$) است. اندازه بلورک‌ها و ثابت شبکه در جدول ۱ گزارش شده است.



شکل ۲ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$)



شکل ۳ تغییرات ثابت شبکه و الگوهای پراش پرتو ایکس در بازه ۳۱-۳۴ درجه نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x=0.0, 1.0, 2.0$)

جدول ۱ مقادیر اندازه بلورکها و ثابت شبکه نمونه‌ها.

اندازه ریز بلورکها $D(nm)$	ثابت شبکه $a(\text{\AA})$	مقدار جانشانی یوروپیوم (x)
۵۳	۱۲,۳۶۸	۰
۵۳	۱۲,۳۹۵	۱,۰
۵۱	۱۲,۴۳۵	۲,۰

ایجاد نوار جدید، جابه‌جایی نوارها و جداسازی در جایگاهی که جانشانی انجام شده و در جایگاه‌های دیگر فقط پهن شدگی و جابه‌جایی رخ می‌دهد [۱۵]. بنابراین جابه‌جایی و پهن شدگی در بیناب فروسرخ دور نمونه‌ها به دلیل جانشانی Eu^{3+} در جایگاه دوازده وجهی است.

در شکل ۵ بیناب‌های رامان نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ و مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$) نشان داده شده‌اند. ۲۵ مد ارتعاشی در بیناب‌های رامان گارنت‌ها مورد انتظار است [۱۶]. این ۲۵ مد شامل، دو مد کششی متقارن جایگاه چهاروجهی (ν_1)، چهار مد خمشی متقارن جایگاه هشت‌وجهی (ν_2)، چهار مد کششی نامتقارن جایگاه چهاروجهی (ν_3)، چهار مد خمشی نامتقارن هشت‌وجهی (ν_4)، چهار مد انتقالی چهاروجهی (T)، سه مد انتقالی مربوط به کاتیون‌های دوازده-وجهی (T_d) و چهار مد شبکه (L) است [۱۶].

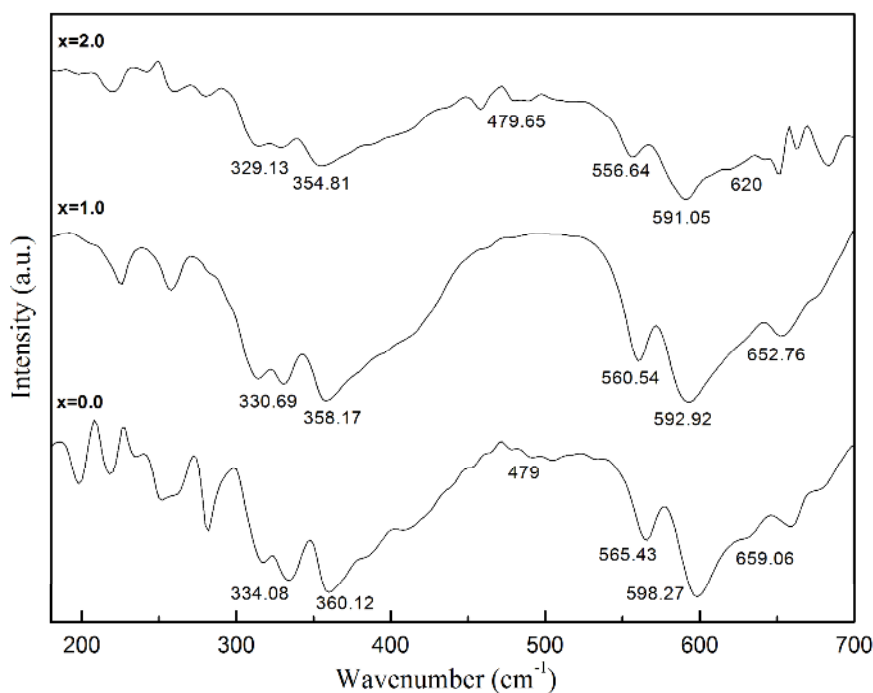
با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که قله‌ی اصلی در 364cm^{-1} است که نشان دهنده‌ی فاز گارنت برای تمامی نمونه‌هاست. قله‌های موجود در 512cm^{-1} و 449 و 364 و 207 و 159 نشان دهنده‌ی ارتعاشات کاتیون‌های جایگاه دوازده‌وجهی هستند [۱۷]. این مدها به آهستگی با افزایش جانشانی دستخوش پهن‌شدگی شده‌اند، پدیده‌های این چنینی ممکن است به علت تنش ناشی از جانشانی یون Eu^{3+} در ساختار باشد. قله‌های مشاهده شده در 677cm^{-1} و 587 مربوط به مدهای کششی نامتقارن جایگاه چهاروجهی ν_3 هستند [۱۷].

شدت قله‌های بالای 800cm^{-1} با افزایش میزان جانشانی کاهش یافته و حتی برخی از آنها نیز از بیناب رامان حذف شده‌اند. دلیل این پدیده را می‌توان به بزرگتر بودن یون Eu^{3+} نسبت به Y^{3+} وابسته دانست، زیرا جانشانی یون Eu^{3+} باعث سنگین‌تر شدن جایگاه دوازده‌وجهی شده و منجر به کم شدن ارتعاشات آن می‌شود، و نیز با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که هیچ جابه‌جایی در عدد موج قله‌ها دیده نمی‌شود.

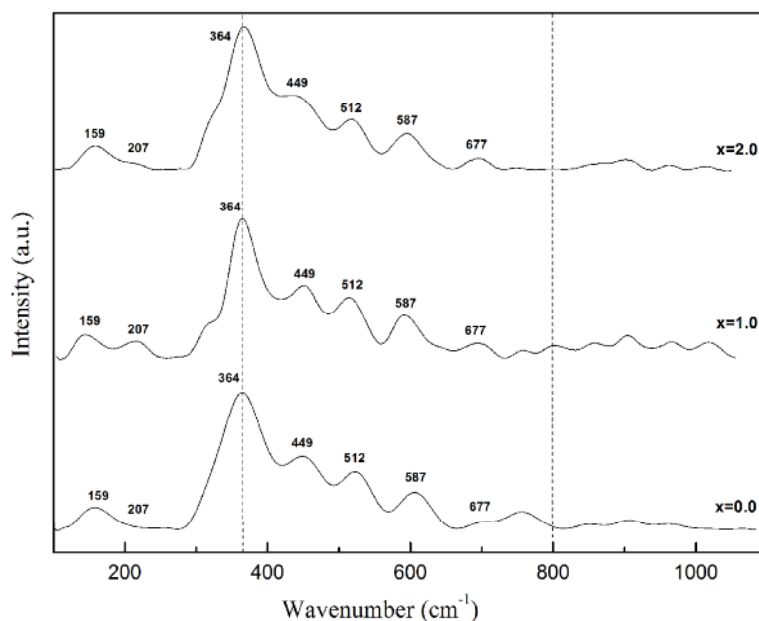
برای بررسی ارتعاشات یون اکسیژن با کاتیون‌های موجود در ساختار YIG بیناب‌های تبدیل فوریه‌ی فروسرخ دور نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$) با استفاده از Far-FTIR گرفته شد که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. براساس بررسی‌های گزارش شده، ۱۷ مد ارتعاشی فعال در بیناب IR گارنت‌ها، مورد انتظار است که این ۱۷ مد شامل، سه مد کششی نامتقارن جایگاه چهار وجهی (ν_3)، سه مد خمشی نامتقارن و یک مد خمشی متقارن جایگاه هشت وجهی (ν_2, ν_4)، دو مد چرخشی و یک مد انتقالی جایگاه چهار وجهی (R, T) سه مد انتقالی کاتیون‌های جایگاه هشت وجهی (T_0) و سه مد انتقالی کاتیون‌های جایگاه دوازده وجهی (T_d) است [۱۲].

در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری، نوارهای IR زیر 228cm^{-1} قابل ثبت نبودند. نوارهای موجود در $565/43$ و $598/27$ و $659/06$ مربوط به مد ارتعاشی ν_3 در $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0$) هستند. نوارهای موجود در 479cm^{-1} و $360/12\text{cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به ν_2 و ν_4 هستند. نوار IR موجود در $334/08\text{cm}^{-1}$ مربوط به مد ارتعاشی T_0 است [۱۳].

با توجه به شدت جذب نوارهای ارتعاشی در شکل ۴، مشاهده می‌شود که این شدت‌ها در جایگاه چهاروجهی نسبت به جایگاه هشت‌وجهی برای همه‌ی نمونه‌ها بیشتر است. با توجه به اولین قانون انتخاب، انتقال بین مدارهای d در جایگاهی که تقارن مرکزی دارد ناممکن است. به همین دلیل کمبود تقارن مرکزی، انتقال بین مدارهای d را ممکن می‌کند. با توجه به اینکه جایگاه چهار وجهی دارای تقارن مرکزی کمتری در مقایسه با جایگاه هشت وجهی است، بنابراین مشاهده‌ی شدت جذب شدیدتر برای نوارهای جایگاه چهاروجهی قابل انتظار است [۱۴]. بیناب‌های IR برای همه‌ی نمونه‌ها یک جابجایی کوچک در نوارهای جذب را نشان می‌دهد. بر اثر جانشانی تغییراتی در بیناب‌های IR پدید می‌آیند که بدین شرح‌اند:



شکل ۴ طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ دور نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$)



شکل ۵ طیف‌های رامان نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$)

بررسی ویژگی‌های مغناطیسی

شکل ۶ منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$) را در دمای اتاق نشان می‌دهد. تغییرات مغناطش اشباع (M_s) نمونه‌ها نیز بر حسب مقادیر جانشانی آورده شده‌اند. مقدار

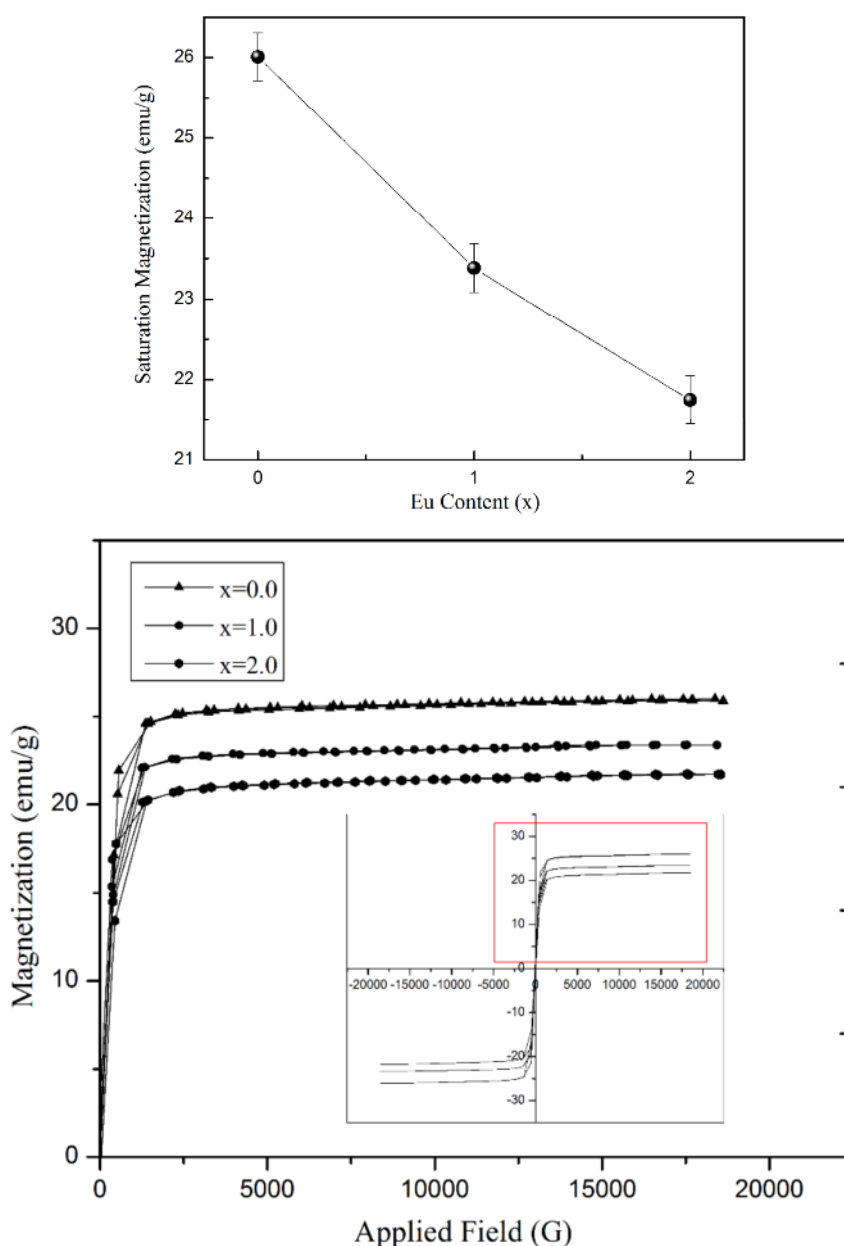
مغناطش اشباع نمونه‌ها با افزایش میزان جانشانی یون Eu^{3+} کاهش می‌یابد. بر مبنای نظریه نیل، گشتاورهای مغناطیسی یون‌های آهن در زیر شبکه‌های a و d نسبت به یکدیگر دارای نظم پادفرومغناطیس هستند و مغناطش کل در ساختار YIG برابر است با [۱۸]:

$$M = |M_d - M_a| - M_c$$

درجات مختلف خواهد شد و تولید دو محیط شیمیایی متفاوت در اطراف زیرشبکه‌های آهن a و d می‌کند. با افزایش میزان جانشانی Eu^{3+} آشفته‌گی ایجاد شده، بسته به تعداد همسایگان Eu^{3+} افزایش، یافته است و سبب شکافت هر یک از زیر شبکه‌های a و d به چندین زیر شبکه مغناطیسی با جهت‌گیری اسپینی متفاوت خواهد شد و گشتاور مغناطیسی موثر تشکیل شده با Fe^{3+} کاهش یافته و منجر به کاهش مغناطش کل می‌شود که این همخوان با نتایج کارهای گذشته است [۲۰].

که مقدار مغناطش جایگاه c به دلیل وجود یون دیامغناطیس Y^{3+} در این جایگاه برابر صفر است. گشتاورهای مغناطیسی یون‌های Eu^{3+} در زیر شبکه c با برآیند گشتاورهای مغناطیسی یون‌های آهن در زیر شبکه‌های a و d به صورت پادفرو مغناطیس سمت‌گیری می‌کنند، بنابراین روند کاهشی مشاهده شده با افزایش جانشانی یون Eu^{3+} در ساختار YIG قابل انتظار است [۱۹].

هنگامی که یونی با شعاع یونی بزرگتر از Y^{3+} وارد ساختار YIG می‌شود موجب آشفته‌گی در زیرشبکه‌های a و d با



شکل ۶ تغییرات مغناطش اشباع و منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$)

برداشت

در این پژوهش برای آماده سازی نمونه های $\text{Eu}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با مقادیر جانشانی ($x = 0.0, 1.0, 2.0$) از روش سل ژل استفاده شد و تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس ساختار تک فاز گارنت نمونه ها را تایید کرد. میانگین اندازه ی بلورکها با افزایش جانشانی یورویوم از ۵۱ تا ۵۳ نانومتر محاسبه شد. ویژگی ها ساختاری نمونه ها به روش آنالیز Far-FTIR و Raman مورد بررسی قرار گرفتند و مدهای ارتعاشی مربوط به جایگاه های چهاروجهی و هشتوجهی و جایگاه دوازده وجهی مشاهده شدند و جابه جایی در جایگاه نوارهای جذب نشان دهنده جانشانی یون یورویوم در ساختار گارنت بود. بررسی چرخه های پسماند مغناطیسی نمونه ها نشان داد که مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی کاهش می یابد که این کاهش با در نظر گرفتن نظریه ی نیل و آشفته گی در شبکه بلوری توضیح داده شد.

مراجع

- process", Journal of the American Ceramic Society 79 (12) (1996) 3257–3265.
- [7] Menzer G., "Die kristall structure der granate", z. kristallogr 69 (1928) 300-396.
- [8] Xiaofeng Guo, Amir H.Tavakoli, Steve Sutton, Ravi Kukkudapu, Liang Qi, Antonio Lanzirrotti, Matt Newvill, Mark Ast, and Alexandra Navortsky, "Cerium substitution in yttrium iron garnets, valence state, structure, and energetics", Journal of chemistry of materials (2013), ppA-K.
- [9] Hosseini Vajargah S., Maddah Hosseini H. R., Nemati Z. A., "Synthesis of nanocrystalline Yttrium iron garnets by sol-gel combustion process: The influence of PH of precursorsolution", Journal of Materials Science and Engineering B 129 (2006) 211-215.
- [10] Cullity B. D., "Elements of X-Ray Diffraction", Addison Wesley publishing company, Inc (1978) 284.
- [11] Cheng Z, Yang H, Yu L, Xu W. "Saturation magnetic properties of $\text{Y}_{3-x}\text{Re}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Re: Gd, Dy, Nd, Sm and La) nanoparticles grown by a sol-gel method". Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 19(2008) 442–447.
- [12] Hofmeister A. M., Campbell K.R., "Infrared spectroscopy of yttrium aluminum, yttrium gallium and yttrium iron garnets", Journal of Applied Physics 72 (1992) 638–646
- [13] Hofmeister A. M., "Infrared microspectroscopy. In H.J. Humecki, Ed., Practical Guide to Infrared Spectroscopy, 2nd ed", p. 377–416. Marcel Dekker, New York.
- [14] A Shaeel, Al-Thabait, "Synthesis and characterization of a new cobalt poly- meric spinels", Commun. dela Facult'e des Sci. de l'Universit'e d'Ankara 49 (2003) 5–14.
- [15] Hild E., Beregi E., "IR spectroscopic investigation of the garnet materials used in the microwave electronics", Chemical Engineering 30 (1986) 235–246.
- [16] Fechine. P.B.A., Silva. E. N., deMenezes. A.S., Derov. F., Stewart. J.W., Drehman. A.J., Vasconcelos. I.F., Ayala. A.P., Cardoso. L.P., Sombra. A.S.B., "Synthesis, structure and vibrational properties of $\text{GdIG}_x\text{YIG}_{1-x}$ ferrimagnetic ceramic composite", Journal of
- [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., "Phase 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 $\text{R}_x\text{Y}_{3-x}\text{Al}_y\text{Fe}_{5-y}\text{O}_{12}$ magneto-optical films," M.S. thesis, Materials Science & Engineering Department, Blacksburg, Va, USA, 2002.
- [6] Shea L. E., McKittrick J., Lopez O. A., Sluzky E., "Synthesis of red-emitting, small particle size luminescent oxides using an optimized combustion

- [19] Mizumaki. M.T., Uozumi. A., Agui. N., Nakazawa. M, "*Admixture of excited states and ground states of a Eu^{3+} ion in $Eu_3Fe_5O_{12}$ by means of magnetic circular dichroism*", Physical Review B 71 (2005) 134416.
- [20] Cheng Z, Cui Y, Yang H, Chen Y. 2009. "*Effect of lanthanum ions on magnetic properties of $Y_3Fe_5O_{12}$ nanoparticles*". Journal of Nanoparticle Research, 11: 1185–1192.
- Physics and Chemistry of Solids 70 (2009) 202–209.
- [17] Wu H, Huang F, Xu T, Ti R, Lu X, Kan Y, Lv X, Zhu W, Zhu J, "*Magnetic and magnetodielectric properties of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ ceramics*", Journal of Applied Physics 117, (2015) 144101.
- [18] Thongmee S., Winotai P., Tang I.M., "*Local field fluctuations in the substituted aluminum iron garnets, $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$* ", Solid State Communications 109 (1999) 471-476.