



اثر جانمایی سربوم بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات گارنت ایتريوم آهن تهیه شده به روش سل-ژل

محمد نیایی فر*، نرگس خلفی، احمد حسن پور

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، گروه فیزیک

(دریافت مقاله: ۹۰/۸/۲۱، نسخه نهایی: ۹۰/۱۲/۲۵)

چکیده: در این پژوهش، نانوذرات گارنت ایتريوم آهن با جانمایی سربوم با فرمول $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$) با پراش سنج پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و بیناب‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ (FT-IR) مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل الگوهای XRD نشان می‌دهد که بالاترین مقدار جانمایی سربوم در ساختار گارنتی نمونه‌ی $x = 0.6$ است. مغناطش اشباعی نمونه‌ها در دمای اتاق نیز با مغناطیس‌سنج ارتعاشی (VSM) اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که با افزایش جانمایی، مغناطش اشباعی تا $x = 0.3$ افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. تغییرات مغناطش اشباعی بر اساس بیناب‌سنجی موسباتر نمونه‌ها بحث شده است. بررسی بیناب‌های موسباتر نشان داد که به دلیل جانمایی سربوم به جای ایتريوم در گارنت YIG زیرشبکه‌های هشت و چهاروجهی هریک به دو زیرشبکه‌ی هشت و چهاروجهی آشفته و ناآشفته تبدیل می‌شوند، و براین اساس کاهش مغناطش برای $x > 0.3$ توجیه شده است.

واژه‌های کلیدی: گارنت ایتريوم آهن؛ سل-ژل؛ سربوم؛ بیناب موسباتر.

مقدمه

یکای فرمولی $R_3Fe_5O_{12}$ است که به شکل $(Fe_3)O_{12}$ و $[Fe_2]$ ، $\{R_3\}$ نوشته می‌شود. توزیع کاتیونی یون‌های مغناطیسی آهن در جایگاه‌های (d) و [a]، مهم‌ترین نقش را در ویژگی‌های مغناطیسی گارنت برعهده دارد، با این حال جانمایی یون‌های مختلف در جایگاه دوازده‌وجهی {c} نیز می‌تواند برهم‌کنش‌های تبدالی را به طور فزاینده‌ای تحت تاثیر قرار دهد و ویژگی‌های مغناطیسی جالبی را عرضه نماید. عنصر سربوم به علت داشتن بالاترین میزان چرخش فازادی در ناحیه‌ی دیدگانی و اتلاف کم در میان عناصر دیگر، نامزد خوبی برای ساخت ابزارهای موج

گارنت ایتريوم آهن (YIG)، وابسته به گروه اکسیدهای مغناطیسی، به علت داشتن مغناطش اشباعی نسبتاً بالا، ضریب دی‌الکتریک مناسب و اتلاف‌های دی‌الکتریکی و مغناطیسی کم به ویژه در بسامدهای بالا کاربردهای فراوانی دارد [۱]. توزیع کاتیونی نسبتاً پیچیده در شبکه‌ی بلورین این گارنت، به ساختار مکعبی مرکز حجمی (bcc) و گروه فضایی (O_h^{10}) شامل سه زیرشبکه‌ی بلوری چهار، هشت و دوازده‌وجهی وابسته است [۲، ۳]. هر یاخته‌ی مغناطیسی آن شامل هشت

نیز با مغناطیس‌سنج نوسانی (VSM) مدل ۱۴ INCH در گستره‌ی ۴۰۰۰- تا ۴۰۰۰ به دست آمد.

بحث و بررسی

شکل ۱ الگوی‌های پراش پرتو ایکس ذرات گارنت $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ پخته‌شده در دمای $700^\circ C$ را نشان می‌دهد. این دما نسبت به دمای تک‌فاز شدن در روش متداول سرامیکی به گونه‌ای چشمگیر پایین‌تر است [۹]. در تمام نمونه‌ها ساختار گارنت مکعبی دیده می‌شود (JCPDS Card No: ۸۳-۱۰۲۷). در نمونه‌ی $x = 0.8$ افزودن بر فاز گارنت، فازهای ناخالصی Fe_2O_3 (JCPDS Card No: ۳۹-۱۳۴۶) و CeO_2 (JCPDS Card No: ۳۴-۰۳۹۴) نیز دیده می‌شود.

تغییرات ثابت شبکه با افزایش مقدار جانشانی در شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش سریوم تا $x = 0.6$ ثابت شبکه افزایش می‌یابد، ولی برای $x = 0.7$ ثابت شبکه کاهش می‌یابد. اگرچه الگوی‌های پراش پرتو ایکس وابسته به این نمونه‌ها (در گستره‌ی دقت دستگاه XRD) تنها فاز گارنت را نشان می‌دهد، ولی احتمال وجود مقدار کمی از ناخالصی در نمونه‌ی $x = 0.7$ حدس زده می‌شود که با پراش‌سنج پرتو ایکس قابل شناسایی نیست و این باعث کاهش ثابت شبکه شده است. در روش متداول سرامیکی بالاترین میزان جانشانی در نمونه‌ی $x = 0.3$ است [۹]. حال آن‌که نتایج این پژوهش $x = 0.6$ را بالاترین مقدار جانشانی سریوم از روش سل-ژل نشان می‌دهد. چگالی نظری نانوذرات ρ از رابطه‌ی

$$\rho = \frac{ZWm}{N_A \alpha^3} \quad (1)$$

محاسبه شد که در این رابطه Z تعداد فرمول در هر یاخته‌ی یک‌ه‌ی واحد گارنت، W_m وزن فرمولی، N_A عدد آووگادرو و α ثابت شبکه‌ی گارنت است. محاسبات افزایش چگالی از 4.05 gr/cm^3 ($x = 0$) به 4.50 gr/cm^3 ($x = 0.7$) به دلیل جرم اتمی بالاتر سریوم (140.12 gr) نسبت به ایتريوم (88.905 gr) را نشان می‌دهد.

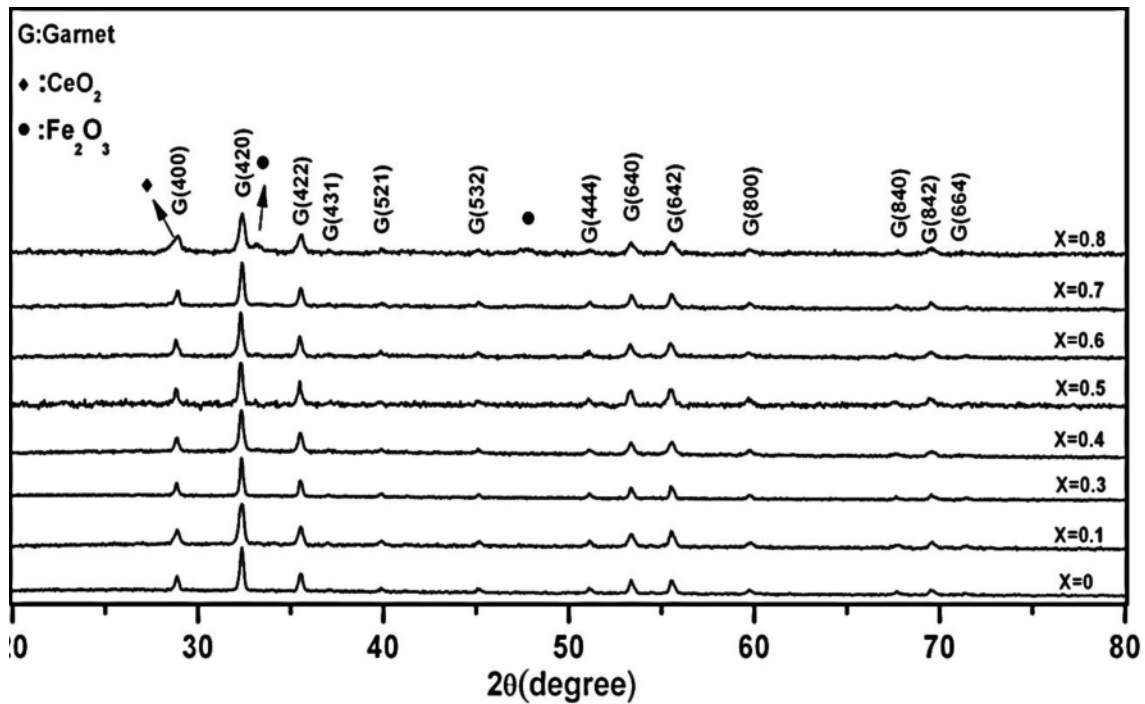
بری ناوارون، پیکربندی‌های انباشتی اپتیکی، حسگرهای جریان الکتریکی و... است [۵،۴]. با پیشرفت روش‌های ساخت نانوذرات در سال‌های اخیر، گزارش‌هایی از ساخت این ماده با روش‌های گوناگون شیمیایی داده شده که از آن جمله می‌توان به روش سل-ژل اصلاح شده [۶]، هم‌رسوبی [۷] و سل-ژل معمولی [۸] اشاره کرد. این پژوهش‌ها بیانگر نتایج متفاوتی از بیشینه مقدار جانشانی سریوم در ساختار گارنتی است. در این پژوهش روش سل-ژل به دلیل دمای پایین لازم برای سنتز، آلاینده‌ی کمتر در محصول نهایی و توزیع مناسب در اندازه‌ی ذرات انتخاب شده است. همچنین اثر افزایش سریوم بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ با ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$) بررسی و با نمونه‌ی کپه‌ای مقایسه شدند.

روش بررسی

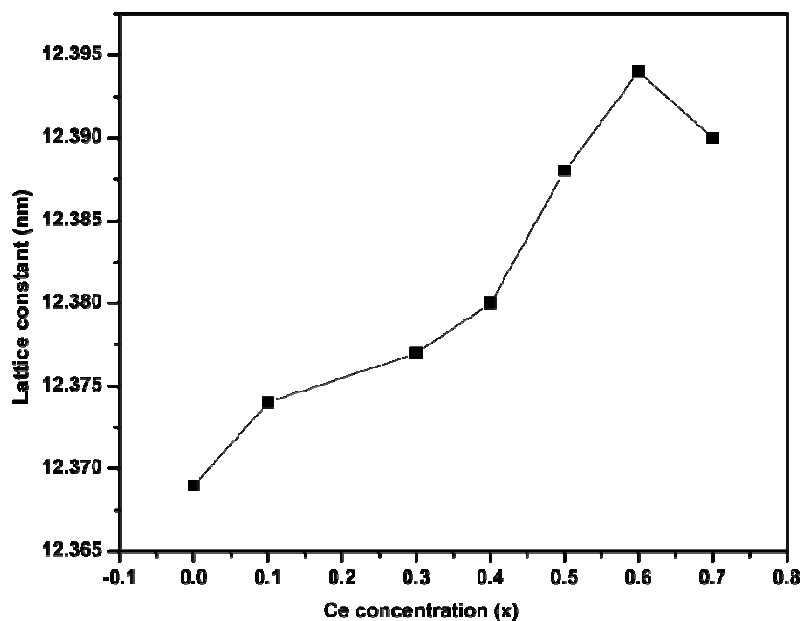
مواد اولیه‌ی به‌کار رفته در تهیه‌ی نانوذرات، شامل نیترات‌های آهن $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ، ایتريوم $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ و سریوم $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ بودند که همه‌ی آنها از شرکت مرک آلمان با کمینه خلوص ۹۹ درصد تهیه شدند. با در نظر گرفتن مقدار بهینه‌ی $C/N = 3$ (نسبت اسید سیتریک به یون نیترات) مواد اولیه و اسیدسیتریک را با نسبت‌های استوکیومتری مناسب در ۱۰۰ ml آب مقطر حل کردیم و برای دستیابی به $pH = 2$ محلول آمونیاک را افزودیم. سل آماده شده در دمای $90^\circ C$ به مدت ۲ ساعت به ژل غلیظی تبدیل شد. ژل به‌دست آمده به مدت ۴۸ ساعت در دمای $115^\circ C$ گرما داده شد تا خشک شود و پس از ساییده شدن، در کوره با آهنگ $5^\circ C / \text{min}$ به مدت ۳ ساعت در دمای $700^\circ C$ گرما داده شد. ساختار بلوری و فاز تشکیل نانوپودرهای به‌دست آمده با پراش‌سنج پرتو ایکس با لامپ مس ($XRDS-SIEFRET$: ID3003)، اندازه‌ی ذرات با میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل (Philip's XL30) و پیوندهای شیمیایی نانوذرات نیز با دستگاه (Perkin FT-IR Elmer BX II) در گستره‌ی عدد موج $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ مورد بررسی قرار گرفت. منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های تک‌فاز

نمی‌بینیم. تصاویر (شکل ۳) نشان‌دهنده نانوذراتی با شکل کروی، همگن و بهم‌چسبیده با اندازه‌ی ۵۰-۷۰ نانومتر است. این بهم‌چسبیدگی زیاد، ناشی از انرژی سطحی بالا در نانوذرات است [۱۰].

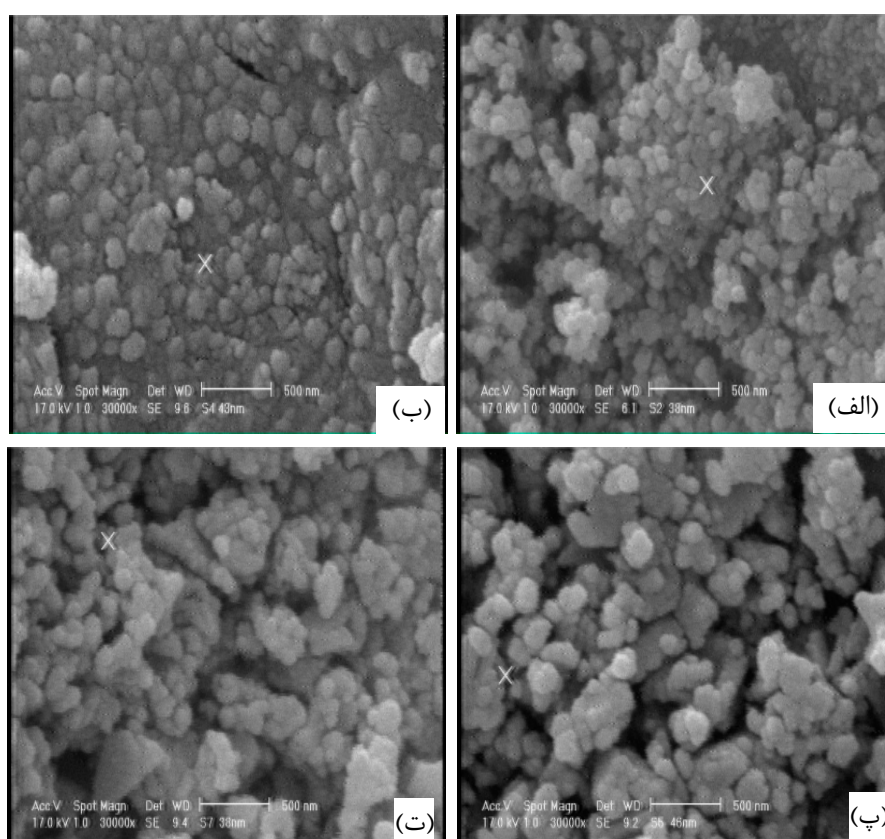
تغییرات میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با رابطه‌ی شرر در گستره‌ی ۳۰ تا ۳۶ نانومتر تعیین شد. از آنجا که دما اصلی‌ترین فاکتور برای افزایش اندازه‌ی بلورک‌هاست، در دمای پخت یکسان (700°C) تغییرات زیادی در اندازه‌ی بلورک‌ها



شکل ۱ الگوی‌های پراش پرتوهای ایکس نانوذرات $\text{Y}_{3-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ با x های گوناگون.



شکل ۲ تغییرات ثابت شبکه بر حسب مقدار جانشانی سریوم.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ برای $x = 0.1$ (الف)، $x = 0.3$ (ب)، $x = 0.5$ (پ)، $x = 0.7$ (ت).

یونی Ce^{3+} (1.181 \AA) و Y^{3+} (1.06 \AA) [۹]، جانشانی سربوم در ساختار گارنت باعث آشفستگی در ساختار بلورین می‌شود. تغییرات طول و زاویه پیوندهای Fe-O نشانه‌ی این آشفستگی است. با توجه به شکل جابه‌جایی پهنه‌ها به سوی اعداد موج کوچکتر، از $597/58 \text{ cm}^{-1}$ به $594/14 \text{ cm}^{-1}$ ، افزایش طول پیوند Fe-O را نشان می‌دهد. از سوی دیگر شدت پیوندهای Fe-O با افزایش جانشانی کاهش یافته و در نتیجه می‌توان حدس زد برهم‌کنش‌های ابرتبادلی Fe-O-Fe نیز کاهش می‌یابد [۱۴، ۱۳].

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب منحنی‌های پسماند مغناطیسی و تغییرات مغناطش اشباعی نانوذرات بر حسب x را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مغناطش اشباعی تا $x = 0.3$ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش به نظریه‌ی نیل نسبت داده می‌شود. بر پایه‌ی این نظریه در یک ساختار YIG، مغناطش یون‌های آهن در زیرشبکه‌های a و d به‌گونه‌ی پادرومغناطیسی نظم می‌گیرند. بنابراین گشتاور مغناطیسی کل هر یکای فرمولی گارنت ایتربوم آهن برابر:

شکل ۴ بیناب‌های تبدیل فوریه‌ی فروسرخ نانوذرات را نشان می‌دهد. گارنت‌ها در گروه فضایی Ia3d اند و بیناب IR آن‌ها باید ۱۷ مد تبهگن سه‌گانه T_{1u} را نشان دهد که تنها برخی از آن‌ها را در ناحیه‌ی مورد بررسی ($400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) می‌شود دید [۱۱]. چنانکه در شکل دیده می‌شود پهنه‌ای در عدد موج 3432 cm^{-1} موجود است که نشانگر وجود پیوند O-H است که به جذب آب از محیط هنگام نمونه‌برداری وابسته است. پهنه‌هایی در گستره‌ی اعداد موج 2345 و 2927 cm^{-1} را می‌توان به ترتیب به CO_2 و گروه‌های پیوندی C-H نسبت داد [۱۲]. تجزیه‌ی ترکیبات اسیدسیتریک و نیترات‌ها منجر به تشکیل گروه‌های N=O می‌شود که به قله‌هایی در گستره‌ی اعداد موج 1617 و 1382 cm^{-1} با شدت کم وابسته است [۲]. پهنه‌های واقع در گستره‌ی 563 ، 595 و 653 cm^{-1} وابسته به مد ارتعاشی ν_4 را نیز می‌توان به نوسان‌های گروه اکسیدهای فلزی به ویژه به گروه‌های پیوندی Fe-O در زیرشبکه‌ی چهاروجهی نسبت داد. در واقع این سه پهنه سرشتی ساختاری گارنت‌ها هستند [۱۱]. با توجه به اختلاف بزرگ شعاع‌های

Ce^{3+} در جایگاه c موازی با گشتاور برآیند یون‌های آهن قرار می‌گیرد. بنابراین بر پایه‌ی رابطه‌ی زیر انتظار داریم مغناطش کل ساختار با افزایش مقادیر جانشانی افزایش یابد:

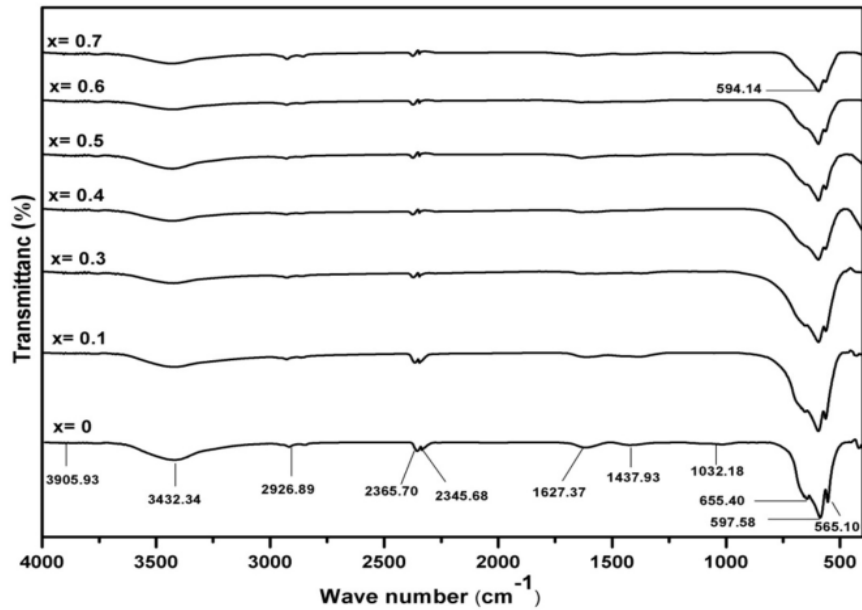
$$M = |xM_c + M_d - M_a| = |xM_c + 3M_{Fe}^{3+} - 2M_{Fe}^{3+}| \quad (3)$$

$$= 5\mu_B + xM_c \quad (M_c \neq 0)$$

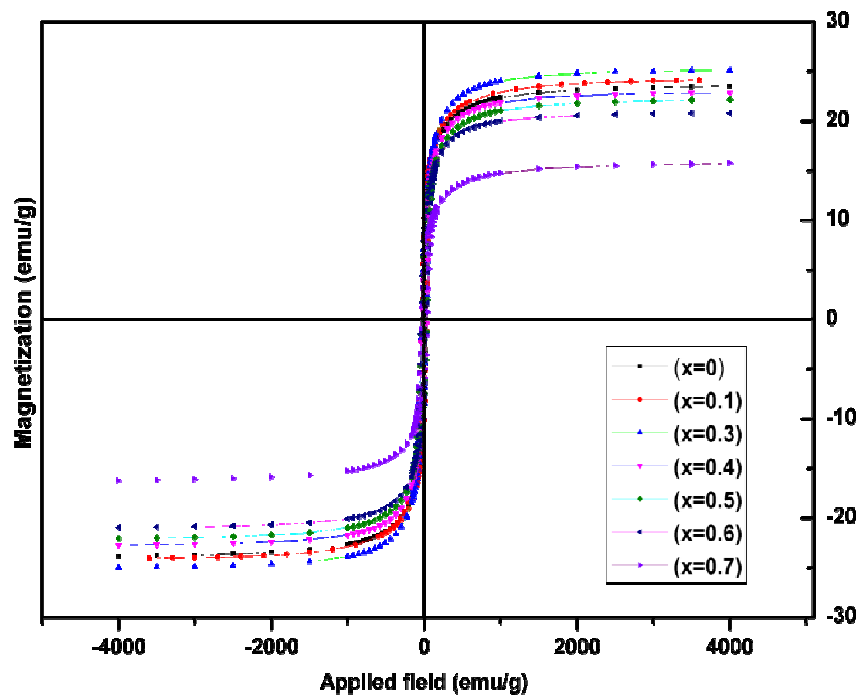
$$M = |M_d - M_a| - M_c = |3M_{Fe}^{3+} - 2M_{Fe}^{3+}| \quad (2)$$

$$= 5\mu_B \quad (M_c = 0)$$

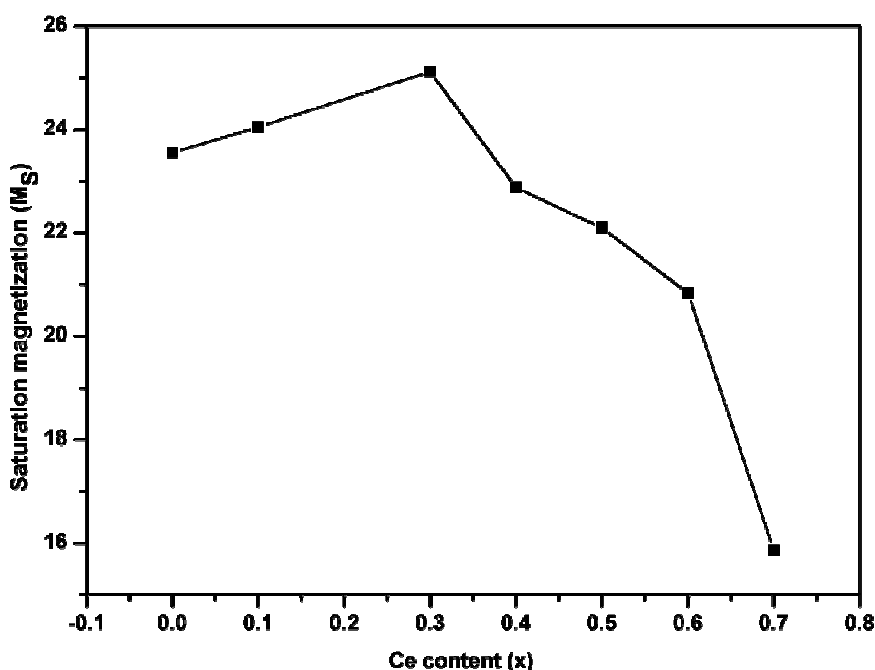
است. یون پارامغناطیس Ce^{3+} با گشتاور مغناطیسی Y^{3+} در جایگاه دوازده‌وجهی می‌شود. از سوی دیگر گشتاور مغناطیسی



شکل ۴ بیناب‌های تبدیل فوریه‌ی فروسرخ نانوذرات $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$.



شکل ۵ منحنی‌های پسماند مغناطیسی نانوذرات $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ با x‌های گوناگون.



شکل ۶ تغییرات مغناطش اشباعی نانوذرات با افزایش مقادیر سریوم.

افزایش جانمایی سریوم جابجایی ایزومری^۴ (IS) زیرشبه‌های a_1 و a_2 ، و نیز d_1 و d_2 کاهش می‌یابد. این رفتار به افزایش چگالی الکترونی s یون‌های Fe^{3+} برآمده از افزایش اثر شیلدینگ^۵ نسبت داده می‌شود [۱۶]. جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش جانمایی Ce^{3+} به جای Y^{3+} مقادیر شکافتگی چهارقطبی (QS) a_1 و a_2 ، و نیز d_1 و d_2 دارای علامت‌های مختلف است. یعنی شکافتگی چهارقطبی a_1 و d_1 مثبت و a_2 و d_2 منفی است. این اختلاف علامت بدین مفهوم است که جانمایی یون سریوم می‌تواند تغییراتی در توزیع بارهای الکترونی هسته‌های آهن ایجاد کند. هنگامی که بار الکترونی هسته کشیده باشد QS مثبت و هنگامی که بار الکترونی تخت و فشرده باشد QS منفی است. لطیفه^۶ و همکاران [۱۷] نشان دادند که تقارن جایگاه آهن در گارنت La-YIG نسبت به گارنت خالص YIG دستخوش آشفتگی شده و این دو نوع مختلف از محیط‌های شیمیایی اطراف یون آهن در جایگاه‌های a و d وجود آورده است. بدین ترتیب و با بهره‌گیری از این نتایج می‌توان تغییر ویژگی‌های مغناطیسی گارنت پس از جانمایی سریوم را توجیه کرد. بنابراین نظریه، زیرشبه‌های a و d به شکل دو زیرشبه‌های a_1 و d_1 ناآشفته و نیز زیرشبه‌های

از سوی دیگر بررسی دقیق‌تر کاهش مغناطش برای $x > 0.3$ بر پایه بیناب‌سنجی موسبائر نمونه‌های Ce-YIG انجام شد. شکل ۷ نمودار به دست آمده از بیناب موسبائر نمونه‌های 0.4 و 0.1 را نشان می‌دهد که نقاط در آن داده‌های تجربی و منحنی پیوسته، با کمینه‌ی انحراف^۱ این نقاط همخوانی دارد. بیناب موسبائر برای نمونه‌های YIG ($x = 0$) دو شش‌تایی^۲ زیمان^۳ با برهم‌کنش‌های ابر ریز مغناطیسی ۴۸۵ و ۳۹۰ به ترتیب برای جایگاه‌های هشت و چهاروجهی را نشان می‌دهد. با افزایش جانمایی سریوم تحلیل بیناب‌های موسبائر نشان می‌دهد که بهترین همخوانی با چهار شش‌تایی و با شکافتگی‌های چهارقطبی (QS)^۳ متفاوت صورت می‌گیرد. جانمایی سریوم با شعاع یونی بزرگتر نسبت به ایتروم در جایگاه دوازده‌وجهی باعث آشفتگی در زیر شبکه‌های a و d می‌شود. بدین ترتیب نمونه‌های جانمایی شده با سریوم دارای دو جفت زیرشبه‌های چهار و هشت‌وجهی ناآشفته، و چهار و هشت‌وجهی آشفته خواهند بود. به عبارت دیگر جایگاه‌های چهار و هشت‌وجهی در همسایگی یون Y^{3+} ناآشفته و جایگاه‌های چهار و هشت‌وجهی در همسایگی یون Ce^{3+} را آشفته در نظر می‌گیریم. از سوی دیگر، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که با

4- Isomer Shift
5- Shielding Effect
6- Lataifeh

1- Least squares fitting
2- Sextet Zeeman
3- Quadrupole Splittings

کرد:

$$M = |xM_c| + |M_1 + M_2| \quad (۶)$$

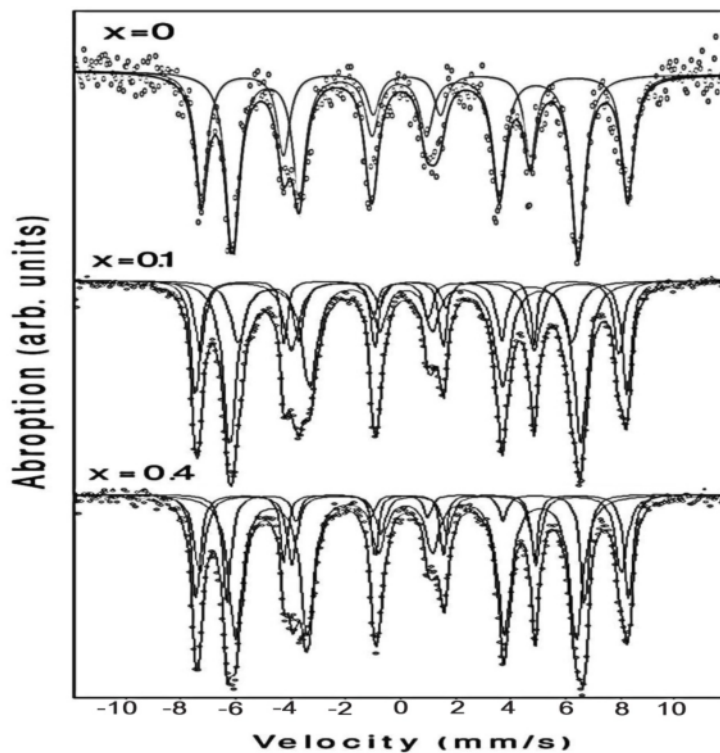
بنابراین با افزایش Ce^{3+} آشفته‌گی زیر شبکه‌های a_2 و d_2 افزایش و زاویه‌ی بین بردارهای M_1 و M_2 (در جهت کاهش مغناطش کل) تغییر می‌کند. به علاوه کاهش بیشتر مقادیر مغناطش در نمونه‌ی $x = 0.7$ نسبت به نمونه‌های پیشین را می‌توان به وجود فاز نامغناطیسی CeO_2 نسبت داد.

a_2 و d_2 آشفته در نظر گرفته شدند. هر جفت زیر شبکه‌ی (a_1 و d_1) و (d_2 و a_2) دارای گشتاورهای مغناطیسی با نظم پادفرمغناطیسی هستند. در این حالت گشتاور موثر مغناطیسی ایجاد شده با زیر شبکه‌های آشفته و ناآشفته به ترتیب با رابطه‌ی (۴) و (۵) بیان می‌شود:

$$M_1 = |M_{d_1} - M_{a_1}| \quad (۴)$$

$$M_2 = |M_{d_2} - M_{a_2}| \quad (۵)$$

در نتیجه می‌توان بردار مغناطش کل را با رابطه‌ی (۶) بیان



شکل ۷ بیناب‌های موسباتر نمونه‌های $x = 0.1$ و $x = 0.4$.

جدول ۱ نتایج تحلیل بیناب‌های موسباتر.

sample	Site	IS(mm/s)	QS(mm/s)	Heff(T)
YIG	a	۰.۲۶	۰.۰۵	۴۸۵
	d	۰.۱	۰.۰	۳۹۰
$Y_{2.9}Ce_{0.1}Fe_5O_{12}$	a1	۰.۱۹۱	۰.۰۵۴	۳۷.۶۱۴
	d1	۰.۴۰۰	۰.۱۱۵	۴۷.۲۸۰
	a2	۰.۰۹۳	-۰.۱۸۲	۳۹.۵۶۸
	d2	۰.۳۶۱	-۰.۰۷۷	۴۸.۶۷۷
$Y_{2.6}Ce_{0.4}Fe_5O_{12}$	a1	۰.۱۷۴	۰.۰	۳۸.۵۴۸
	d1	۰.۴۰۸	۰.۱۱۹	۴۷.۶۹۹
	a2	۰.۰۵۶	-۰.۲۲۵	۴۰.۴۶۵
	d2	۰.۳۵۱	-۰.۱۰۵	۴۸.۹۴۲

برداشت

نانوذرات گارنت ایتريوم آهن جانشانی شده با سریوم به روش سل-ژل تهیه شد و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی ویژگی مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که مغناطش اشباع نمونه‌ها با جانشانی سریوم تا $x = 0.3$ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با بررسی بیناب‌های موسباتر نمونه‌ها مشخص شد که زیرشبکه‌های a و d به دلیل جانشانی به دو جفت زیرشبکه‌ی a_1 و d_1 ناآشفته و a_2 و d_2 آشفته تبدیل می‌شوند و بدین ترتیب رفتار کاهشی مغناطش برای $x > 0.3$ با در نظر گرفتن برآیند برداری گشتاور مغناطیسی دو جفت زیرشبکه‌ی a و d توجیه شد.

قدردانی

از مسئولین آزمایشگاه نانومواد مغناطیسی سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [7] Fengbing S., Qiang L., "Valence control of Ce ions in Ce-YIG", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.Ed (2005) 1-4.
- [8] Xo H., Yung H., "Effect of chromium on magnetic properties of $Y_{2.9}Ce_{0.1}Fe_{5-x}Cr_xO_{12}$ Nanoparticles", Journal of Material and Processes 23 (2008)10-13.
- [9] Mao T., Chen J. C., "Influence of the addition of CeO_2 on the microstructure and the magnetic properties of yttrium iron garnet ceramic", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 302 (2006) 74-81.
- [10] Shaibob R., Baa' Yah Ibrahim N., Abdullah M, Abdulhade F., "The physical properties of Eb-YIG film prepared by a sol-gel method", Journal of Nanomaterials 2012 (2011) 1-5.
- [11] Ristic M., Nowik I., Popovic S., Felner I., Music S., "Influence of synthesis procedure on the YIG formation", Journal of Materials Letters 57 (2003) 2584-2590.
- [12] Lampman G.M., Pavia D.L., Kriz G.S., "Introduction to spectroscopy: A guide for students of organic chemistry", Harcourt Brace College Publishers (1996) 110-115.
- [13] Xu H., Yang H., "Magnetic Properties of $Y_3Fe_5O_{12}$ Nanoparticles Doped Bi and Ce Ions", Journal of Materials and Manufacturing Processes 23 (2008) 1-4.
- [14] Berchmans L. J., Devi M. P. I., Amalajyothi K., "Novel Combustion Synthesis of La^{3+} Substituted $MnFe_2O_4$ ", International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis 18 (2008) 11-14.
- [15] Muranaka T., Akimitsu J., "Thermodynamic properties of ferromagnetic Ce-compound, $CeAgAl_3$ ", Journal of Physica C 462 (2007) 688-690.
- [16] Lee Y.B, Chae K.P, Lee S.H., "Mössbauer study of substituted YIG, Y-Gd-Fe-In-O system", Journal of Physics and Chemistry of Solids 62 (2001)1335-1340.
- [17] Lataifeh M.S., Mahmood S., Thomas MF., "Mössbauer spectroscopy study of substituted rare earth iron garnets at low temperature", Journal of Physica B 321 (2002) 143-148.
- [1] Sztaniszlav A., Farkas-Jahnke M., Balla M., "Kinetics of Garnet Formation in In^{3+} -Substituted Systems", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215 (2000) 188-193.
- [۲] یار محمد سطری. م، مظفری. م، عمیقیان. ج، "تهیه نانوذرات گارنت ایتريوم آهن (YIG) به روش سل-ژل و بررسی ویژگی‌های مغناطیسی آن"، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۷) ص ۲۸۱-۲۸۶.
- [3] Morrish A.H., "The physical principles of magnetism", John Wiley & Sons (1965) 511-516.
- [4] Niyafar M., Beitollahi A., Shiri N., Mozaffari M., Amighian J., "Effect of indium addition on the structure and magnetic properties of YIG", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 777-779.
- [5] Xu Y., Yang J.H., Zhang X. J., "Quantum Theory of the magneto-optical effect of Ce-substituted yttrium iron garnet", Journal of Physical Review B 50 (1994).
- [6] Kum J. S., Kim J. S., Shim I. B., Kim Ch. S., "Mössbauer Studies and Magnetic Properties of Ce-YIG", Journal of Hyperfine Interaction 156/157(2004) 164-174.