



بررسی ویژگی‌های مغناطیسی و بیناب سنجی موسبائر ذرات گارنت ایتريوم آهن بیسموتی $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ تهیه شده به روش سل-ژل

محمد نیایی فر*

گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز

(دریافت مقاله: ۹۴/۱/۱۸، نسخه نهایی: ۹۴/۳/۹)

چکیده: در این پژوهش ذرات گارنت ایتريوم آهن بیسموتی $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با مقادیر جانشانی $x = (0/0, 0/1, 0/2, 0/3)$ به روش سل-ژل تهیه شدند. تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD)، ساختار تک فاز اسپینلی را در تمام نمونه‌ها تایید کرد. چرخه‌های پسماند به دست آمده از مغناطش سنج ارتعاشی (VSM) نشان دهنده‌ی افزایش مغناطش اشباع تا $x = 0/1$ و سپس یک روند کاهشی در گستره‌ی $x > 0/1$ است. این تغییرات به افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی و شکافتگی حاصل از کج شدگی اسپینی در هر یک از زیر شبکه‌ها نسبت داده شد. همچنین برای دست‌یابی به بهترین همخوانی در تحلیل الگوهای بیناب سنج موسبائر (Mössbauer Spectroscopy)، از مدل توزیع تصادفی یون‌های Bi^{3+} در ساختار گارنت ایتريوم آهن (YIG) استفاده شد. این مدل اثر جانشانی یون بیسموت بر تغییر پارامترهای ابر ریز مغناطیسی را توجیه می‌کند و تایید کننده‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل چرخه‌های پسماند مغناطیسی است.

واژه‌های کلیدی: بیناب سنج موسبائر؛ مدل توزیع تصادفی؛ مغناطیس سنج ارتعاشی؛ گارنت ایتريوم آهن بیسموتی؛ سل-ژل.

مقدمه

میان گارنت‌های آهن است و توزیع کاتیونی آن به صورت $\{Y^{+3}\}_c [Fe^{+2}]_a (Fe^{+3})_d O_{12}$ نمایش داده می‌شود که در آن جایگاه‌های دوازده وجهی به‌وسیله‌ی یون ایتريوم و جایگاه‌های چهاروجهی (d) و هشت وجهی (a) به وسیله‌ی یون‌های آهن اشغال شده‌اند به طوری که گشتاورهای مغناطیسی جایگاه‌های d و a به شکل پادموازی نسبت به یکدیگر جهت‌گیری می‌کنند [۵]. پژوهش‌های ویتکوک و همکاران در سال ۱۹۵۷ نشان داد که جا نشانی یون Bi^{3+} در ساختار YIG اثر فزادگی را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد [۶] و تا کنون پژوهشگران بسیاری به دلیل کاربردهای مغناطونوری این ترکیب به بررسی اثر جا نشانی عنصر بیسموت در شبکه‌ی گارنت ایتريوم آهن پرداخته‌اند [۷-۱۵].

در سال‌های اخیر، نانوذرات مغناطیسی گارنت ایتريوم آهن و ایتريوم آهن آرایش شده با عناصر مختلف به دلیل داشتن خواص مغناطیسی، اپتیکی و الکترونیکی، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای بسیار متنوع این ذرات، می‌توان به استفاده آن‌ها در ابزارهای موج بری ناوارون، قطعات مجتمع اپتیکی، وسایل میکروموج، حافظه‌های مغناطونوری با کارایی‌های بسیار بالا، چرخنده‌ها و جداکننده‌ها اشاره کرد [۱-۴].

گارنت ایتريوم آهن (YIG) یک فری مغناطیس با ساختار مکعبی است که هر یاخته قراردادی آن شامل هشت فرمول شیمیایی $Y_3Fe_5O_{12}$ است. این ماده که به گروه فضایی $Ia3d(O_h^{10})$ تعلق دارد، شناخته شده‌ترین و مهم‌ترین ترکیب

*نویسنده مسئول، تلفن: ۷-۳۴۴۵۷۱۷۴ (۰۶۱)، نامبر: ۳۴۴۳۵۲۸۸ (۰۶۱)، پست الکترونیکی: md.niyaiifar@gmail.com

بیشینه ۱۰kOe مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین بیناب‌های موسبائر نمونه‌ها با استفاده از بیناب سنج موسبائر^۴ مدل 1101CM-Russia اندازه‌گیری شدند.

بحث و بررسی

بررسی ساختاری

الگوهای پراش پرتو ایکس ذرات گارنت ایتريوم آهن بیسموتی $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با مقادیر جاننشانی $0.7 \leq x \leq 0.9$ ، در شکل ۱ آورده شده‌اند. همخوانی الگوها با کارت استاندارد (۰۵۰۷-۰۴۳-۰۰)، تشکیل ساختار مکعبی اسپینلی را برای تمام نمونه‌ها تأیید کرد. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با استفاده از فرمول دبای - شرر در بازه‌ی ۶۳-۵۲ نانومتر برآورد شد. تغییرات ثابت شبکه در شکل ۲ آورده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با جاننشانی یون بیسموت در ترکیب، ثابت شبکه افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل بزرگتر بودن شعاع یونی Bi^{3+} (1.17 \AA) در مقایسه با شعاع یونی Y^{3+} (1.09 \AA) است [۱۷].

بررسی ویژگی‌های مغناطیسی

شکل ۳ منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های (۰.۳، ۰.۲، ۰.۱، ۰.۰) $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ را در یک میدان بیشینه‌ی ۱۰kOe و در دمای اتاق نشان می‌دهد. همچنین تغییرات مغناطش اشباع (Ms) نمونه‌ها بر حسب میزان جاننشانی در شکل آورده شده‌اند. مقدار مغناطش اشباع نمونه‌ها با افزایش میزان جاننشانی یون Bi^{3+} از $x = 0.1$ تا $x = 0.9$ افزایش می‌یابد و سپس برای نمونه‌های جاننشانی شده به میزان $x > 0.1$ روند کاهشی دارد. بر مبنای نظریه نیل، گشتاورهای مغناطیسی یون‌های آهن در زیرشبکه‌های a و d نسبت به یکدیگر دارای نظم پادفرومغناطیس هستند و مغناطش کل در ساختار YIG برابر است با [۱۸]:

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

که مقدار مغناطش جایگاه c به دلیل وجود یون دیامغناطیس Y^{3+} در این جایگاه، برابر صفر است. بنابراین انتظار می‌رود با جاننشانی یون دیامغناطیس Bi^{3+} به جای ایتريوم، مقدار مغناطش کل تغییر نکند. در توجیه تغییرات مغناطش مشاهده شده در این کار، اثر اختلاف شعاع یونی بیسموت نسبت به ایتريوم در ساختار گارنت ایتريوم آهن در نظر گرفته شد.

با وجود پژوهش‌های فراوان، بررسی اندکی در زمینه‌ی تحلیل موسبائر این ترکیب گزارش شده است. در این راستا ژو و همکاران^۱ با بررسی طیف موسبائر نمونه‌ی $Y_{2.0}Bi_{1.0}Fe_5O_{12}$ ، کاهش مغناطش ناشی از جا نشانی بیسموت را به شکافتگی زیر شبکه‌ها و کج شدگی اسپینی نسبت دادند ولی مدل ارائه شده برای دستیابی به بهترین همخوانی در طیف موسبائر دارای قاعده‌ی مشخصی نبود و تغییرات پارامترهای ابر ریز مغناطیسی (ناشی از جاننشانی‌های متفاوت یون بیسموت) با استفاده از این مدل قابل توجیه نبود [۱۶]. در این پژوهش، از روش سل-ژل برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد و اثر جاننشانی یون بیسموت در ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی و پارامترهای ابر ریز مغناطیسی Bi -YIG با ارائه یک مدل توزیع، مورد بررسی قرار گرفت.

روش ساخت

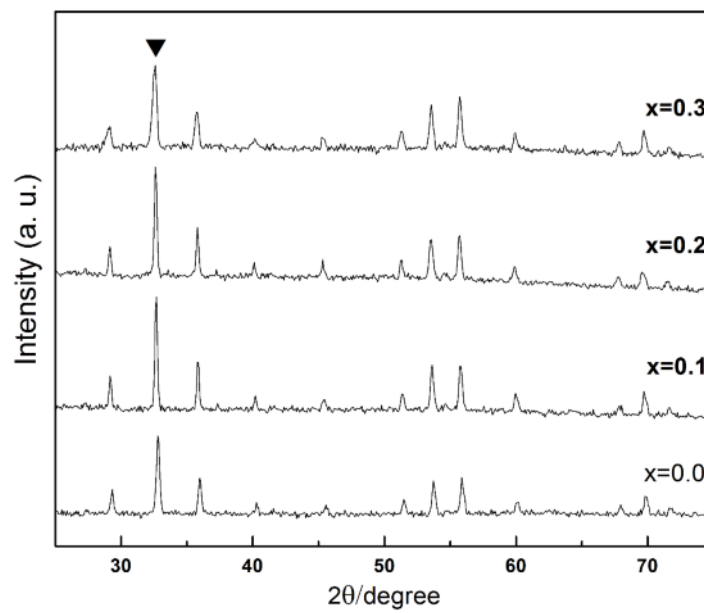
ذرات گارنت ایتريوم آهن بیسموتی با ترکیب $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ و با مقادیر جاننشانی (۰.۳، ۰.۲، ۰.۱، ۰.۰) $x =$ به روش سل ژل تهیه شدند. برای ساخت نمونه‌ها، نخست بنابر روابط عنصرسنجی، محلولی از نمک های نیترات ایتريوم $Y(NO_3)_3 \cdot 3H_2O$ ، نیترات آهن $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ و نیترات بیسموت $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ با خلوص ۹۹/۹۹ درصد در آب یون زدایی شده تهیه، و سپس محلول اسید سیتریک $C_3H_8O_7 \cdot H_2O$ به این محلول اضافه شد. تا محلولی از سیترات و نیترات با نسبت ۱:۳ به دست آمد این محلول با همزن مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق هم زده شد و برای دستیابی به pH=۲، آمونیاک ده مولار به محلول حاصل افزوده شد. محلول نهایی به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد گرما داده شد تا سل تولید شده به ژل تبدیل شود. سپس ژل به دست آمده را در دمای $115^\circ C$ به مدت ۴۸ ساعت کاملاً خشک کردیم. در نهایت پودر خشک شده برای گرمادهی، در دمای $1000^\circ C$ به مدت ۳ ساعت در کوره قرار داده شد. الگوهای پراش پرتو ایکس^۲ (XRD) نمونه‌ها با استفاده از Seifert 3003 تهیه شدند. منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌ها با یک مغناطش سنج ارتعاشی^۳ (VSM)، ساخت شرکت مغناطیس دانش پژوه کاشان، در میدان

1- Xu et al

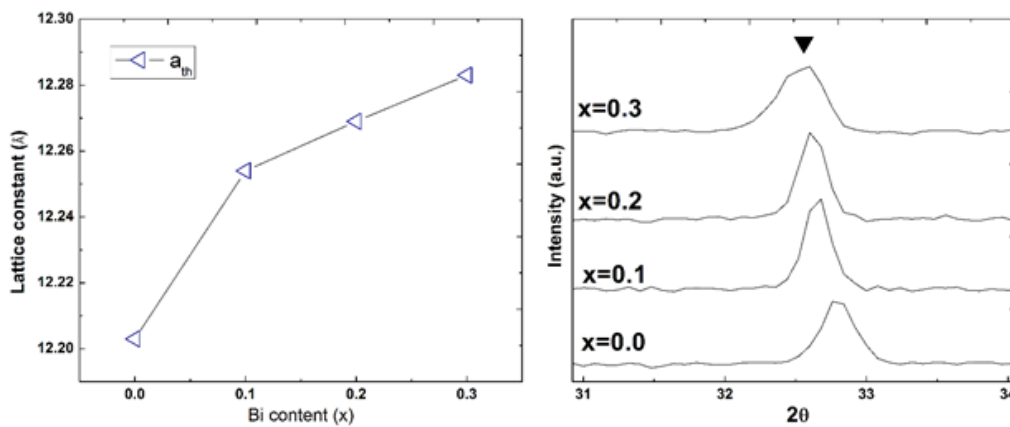
2- X-ray diffraction

3- Vibrating sample magnetometer

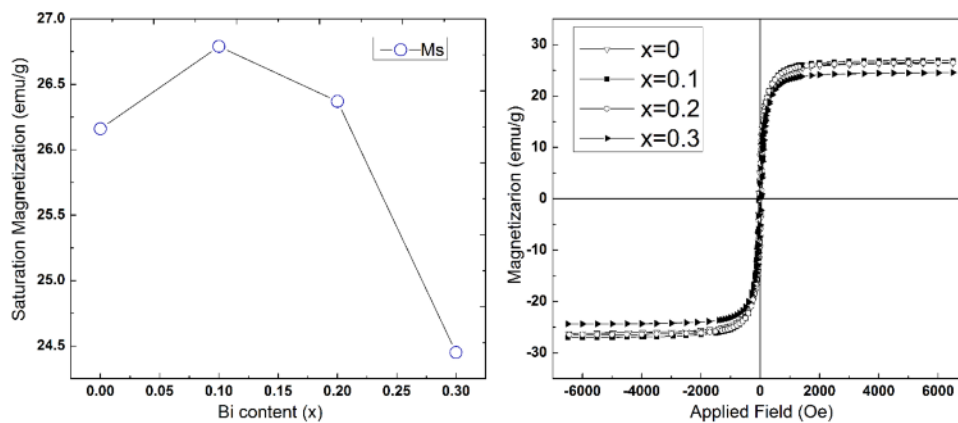
4-Mössbauer spectroscopy



شکل ۱ الگوی پراش پرتو x نمونه های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با میزان جانشانی $(x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3)$.



شکل ۲ الگوهای پراش پرتو x در بازه ۳۱-۳۴ درجه و تغییرات ثابت شبکه نمونه های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ برحسب میزان جانشانی $(x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3)$.



شکل ۳ منحنی های پسماند مغناطیسی و تغییرات مغناطش اشباع نمونه های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ برحسب میزان جانشانی $(x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3)$.

اسپین‌های قطبیده در مدارهای s است. بنابراین اختلاف مشاهده شده در H_{hf} به دلیل تاثیر یونش مداری $3d$ یون‌های آهن بر قطبیدگی مدارهای s و کوچکتر بودن طول پیوند $Fe-O$ در جایگاه‌های d نسبت به مقدار وابسته به جایگاه a است [۲۲].

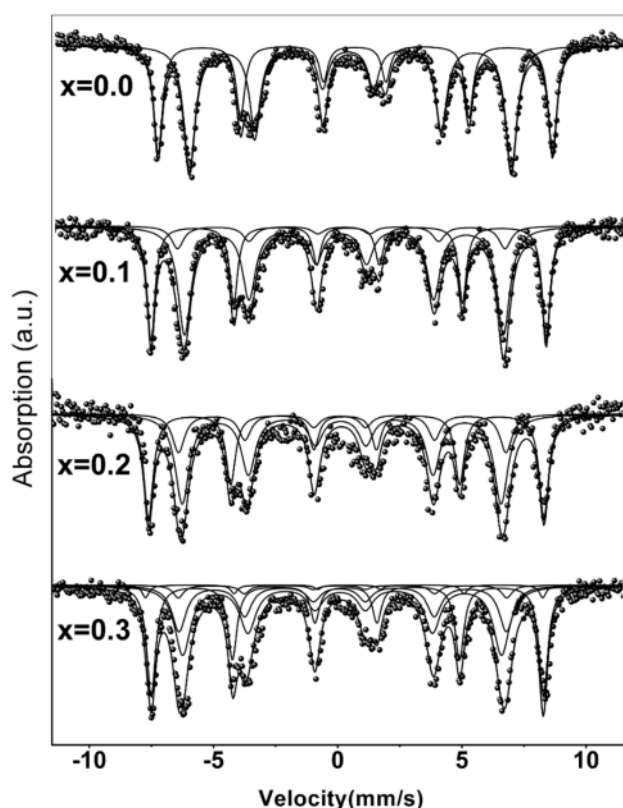
آیزومر جابه‌جایی ^{11}IS زیرطیف شش تایی وابسته به یون‌های Fe^{3+} در چهاروجهی کمتر از مقادیر وابسته به آن در هشت وجهی است. این تفاوت ناشی از اختلاف پیوند هم‌ارزی $Fe-O$ در دو جایگاه است. در پیوندهای یونی-هم‌ارزی، یون Fe^{3+} دارای آرایش الکترونی $3d^5 4s^0$ به جای $3d^5$ است که در آن مقدار x نشان دهنده‌ی میزان یونی بودن ترکیب است (با افزایش مقدار x ویژگی یونی کاهش و میزان هم‌ارزی ترکیب افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه طول پیوندهای $Fe-O$ در جایگاه‌های d نسبت به a کوتاهتر است، پیوند هم‌ارزی در جایگاه چهار وجهی بیشتر و تعداد الکترون‌های مدار s بیشتر

با توجه به گزارش‌های ارائه شده توسط کیم و همکاران^۵ و لیو و همکاران^۶، ورود یون بیسموت با شعاع یونی بزرگتر نسبت به شعاع یونی ایتریوم، ساختار بلوری را دستخوش آشفستگی کرده و سبب افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی و جفت شدگی اسپین-مدار می‌شود [۲۰، ۱۹]. در واقع بالاتر بودن دمای کوری ساختار $Bi-YIG$ (۵۹۱ K) نسبت به دمای کوری گارنت ایتریوم آهن (۵۵۳ K) [۲۱] را می‌توان به دلیل افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی ناشی از جانشانی بیسموت در ساختار بلوری دانست. بنابراین، افزایش مشاهده شده تا $x = 0.1$ را می‌توان به افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی بین یون‌های آهن در زیرشبکه‌های چهار وجهی و هشت وجهی نسبت داد.

با افزایش میزان جانشانی یون بیسموت در نمونه‌های جانشانی شده با $x > 0.1$ ، آشفستگی ایجاد شده در ساختار بلوری افزایش یافته و سبب شکافتگی هر یک از زیر شبکه‌های a و d به چندین زیر شبکه‌ی مغناطیسی با سمتگیری‌های اسپینی متفاوت خواهد شد. افزایش یون‌های بیسموت در نزدیکترین همسایگی هر یک از زیر شبکه‌ها میزان شکافتگی ناشی از کج شدگی اسپینی را افزایش می‌دهد و مغناطش اشباع کل کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش مغناطش اشباع مشاهده شده در نمونه‌های $x > 0.1$ را می‌توان به چیرگی اثر کاهش مغناطش به اثر افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی نسبت داد.

بررسی بیناب سنج موسبائر

شکل ۴ الگوهای به‌دست آمده از بیناب سنجی موسبائر نمونه‌های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$) را در دمای اتاق نشان می‌دهد. در این شکل نقاط نشان دهنده‌ی طیف‌های تجربی-آزمایشگاهی^۷ و خط ممتد^۸ حاصل برهم‌نهی طیف‌های نظری است. با توجه به شکل، نمونه‌ی $x = 0.1$ حاصل برهم‌نهی دو زیر طیف شش تایی وابسته به یون‌های آهن در جایگاه های چهاروجهی و هشت وجهی است. در این نمونه میدان ابر ریز مغناطیسی^۹ (H_{hf}) برای زیر طیف شش تایی مربوط به یون‌های Fe^{3+} در جایگاه a (۴۸T) بزرگ تر از میدان ابر ریز Fe^{3+} در جایگاه d (۳۹T) است. به‌طور کلی برهم‌کنش ابر ریز مغناطیسی ناشی از برهم‌کنش فرمی کانتکت^{۱۰} بین هسته و



شکل ۴ الگوهای موسبائر نمونه‌های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با میزان جانشانی ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$).

- 5- Kim et al.
- 6- Liu et al.
- 7- Experimental data
- 8- Fitted data
- 9- Magnetic hyperfine field
- 10- Fermi contact

$$P_a(x, n) = \frac{2!}{n!(2-n)!} \left(1 - \frac{x}{3}\right)^n \left(\frac{x}{3}\right)^{2-n}$$

در این رابطه x مقدار Bi^{3+} جا نشانی شده در ترکیب و n تعداد یون های Y^{3+} نزدیک ترین همسایه یون های آهن در جایگاه-های a و d هستند. احتمال P_a و P_d محاسبه شده برای نمونه-های $x = 0.1$ تا $x = 0.3$ در جدول ۱ آورده شده اند و با در نظر گرفتن مقادیر بالاتر از 0.09 طیف های نظری حاصل برهنه می عبارتند از سه زیرطیف شش تایی کمینه ($x = 0.1$)، و پنج زیر طیف شش تایی بیشینه ($x = 0.3$).

بر اساس مدل مطرح شده و الگوی بهترین همخوانی بدست آمده، انتظار می رود که میدان ابر ریز مغناطیسی هر زیرطیف شش تایی با افزایش تعداد یون های Bi^{3+} در همسایگی یون های آهن، افزایش یابد. در واقع افزایش H_{hf} به علت افزایش الکترون $4s$ ناشی از کاهش طول پیوند Fe-O است. همچنین، با افزایش تعداد یون های بیسموت در نزدیکترین همسایگی یون های آهن مقدار جابه جایی آیزومری در هر دو جایگاه a و d روند کاهشی خواهد داشت. این کاهش به علت تغییر هم آرزوی ناشی از جانشانی یون Bi^{3+} با شعاع بزرگتر نسبت به یون Y^{3+} است. با در نظر گرفتن مدل یاد شده پارامترهای موسبائر حاصل از این تحلیل در جدول ۲ آورده شده اند.

است. در نتیجه چگالی الکترونی هسته در جایگاه d نسبت به جایگاه a بیشتر است. بنابراین جابه جایی همیاری یون های آهن در جایگاه های چهاروجهی کمتر از مقادیر وابسته در هشت وجهی است [۲۳]. با افزایش میزان جانشانی Bi^{3+} در نمونه های $x = 0.1$ تا $x = 0.3$ ، زیر طیف های شش تایی در هر دو جایگاه a و d پهن شده اند. برای توجیه این پهن شدگی، توزیع تصادفی یون های Bi^{3+} در جایگاه دوازده وجهی مورد بررسی قرار گرفت. در ساختار $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ هر یون آهن در جایگاه چهاروجهی دارای شش همسایه یون نزدیک و هر یون آهن در جایگاه هشت وجهی دو همسایه یون نزدیک به جایگاه c دارند. با این دیدگاه، هفت همسایه یون نزدیک متفاوت برای جایگاه d انتظار می رود؛ 6Y^{3+} ، $(1\text{Bi}^{3+} + 5\text{Y}^{3+})$ ، $(2\text{Bi}^{3+} + 4\text{Y}^{3+})$ ، $(3\text{Bi}^{3+} + 3\text{Y}^{3+})$ ، $(4\text{Bi}^{3+} + 2\text{Y}^{3+})$ ، $(5\text{Bi}^{3+} + 1\text{Y}^{3+})$ و 6Bi^{3+} . احتمال حضور P_d هر کدام از همسایه های نزدیک جایگاه d با استفاده از فرمول توزیع زیر محاسبه شد.

$$P_d(x, n) = \frac{6!}{n!(6-n)!} \left(1 - \frac{x}{3}\right)^n \left(\frac{x}{3}\right)^{6-n}$$

از طرف دیگر، سه جایگاه متفاوت a متناسب با همسایه های نزدیک جایگاه c قابل انتظارند؛ 2Y^{3+} ، $(1\text{Bi}^{3+} + 1\text{Y}^{3+})$ و 2Bi^{3+} و احتمال حضور یون های آهن در جایگاه a با هر کدام از این همسایه با فرمول توزیع زیر محاسبه شد.

جدول ۱ احتمال حضور یون های بیسموت و ایتریوم با ترکیب متفاوت بر حسب تعداد یون های ایتریوم (n) در نزدیکترین همسایه جایگاه های چهاروجهی (P_d) و هشت وجهی (P_a) محاسبه شده با استفاده از فرمول توزیع.

n	x = 0.1		x = 0.2		x = 0.3	
	Pa	Pd	Pa	Pd	Pa	Pd
6		0.815		0.661		0.531
5		0.168		0.283		0.354
4		0.014		0.050		0.098
3		6.7×10^{-4}		0.004		0.014
2	0.934	1.7×10^{-5}	0.871	2.5×10^{-4}	0.810	0.001
1	0.064	$2/4 \times 10^{-7}$	0.127	$7/3 \times 10^{-6}$	0.190	$5/4 \times 10^{-5}$
.	0.004	$1/3 \times 10^{-9}$	0.001	$8/7 \times 10^{-8}$	0.100	$1/3 \times 10^{-3}$

جدول ۲ مقادیر جابه‌جایی همیاری (IS)، شکافت چهارقطبی (QS)، میدان ابر ریز مغناطیسی (H_{hf})، پهنای قله‌ی (w) و نسبت یون‌های آهن (Area) در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت و جبهی به‌دست آمده از بهترین همخوانی در الگوهای موسباتر.

ترکیب $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$	جایگاه	جابه‌جایی آیزومری IS (mm/s)	شکافت چهارقطبی QS (mm/s)	میدان فوق ریز مغناطیسی H_{hf} (T)	پهنای پیک w (mm/s)	Area(%)
$Y_3Fe_5O_{12}$	a	۰٫۳۷۴	-۰٫۰۲	۴۸٫۲۴	۰٫۴۰	۳۹٫۴
	d	۰٫۱۴۵	-۰٫۰۹	۳۹٫۳۵	۰٫۵۳	۶۰٫۶
$Y_{2.9}Bi_{0.1}Fe_5O_{12}$	a	۰٫۳۶۸	-۰٫۰۲	۴۹٫۳۵	۰٫۳۸	۳۵٫۳
	d ₁	۰٫۱۳۹	-۰٫۱۰	۳۹٫۸۲	۰٫۶۳	۵۴٫۲
	d ₂	۰٫۱۳۲	-۰٫۱۰	۴۰٫۹۱	۰٫۵۹	۱۰٫۵
$Y_{2.8}Bi_{0.2}Fe_5O_{12}$	a	۰٫۳۵۲	-۰٫۰۴	۴۹٫۴۳	۰٫۴۵	۳۶٫۵
	d ₁	۰٫۱۳۷	-۰٫۰۳	۳۹٫۸۳	۰٫۶۸	۴۶٫۲
	d ₂	۰٫۱۳۳	-۰٫۱۰	۴۰٫۹۴	۰٫۵۹	۱۷٫۳
$Y_{2.7}Bi_{0.3}Fe_5O_{12}$	a ₁	۰٫۳۵۰	-۰٫۰۵	۴۹٫۵۲	۰٫۴۳	۳۳٫۶
	a ₂	۰٫۳۳۸	-۰٫۲۰	۴۹٫۶۶	۰٫۳۲	۲٫۹
	d ₁	۰٫۱۳۸	-۰٫۰۷	۳۹٫۸۷	۰٫۷۷	۳۷٫۲
	d ₂	۰٫۱۳۴	-۰٫۱۰	۴۰٫۹۶	۰٫۶۸	۲۱٫۹
	d ₃	۰٫۱۳۱	-۰٫۱۰	۴۱٫۰۷	۰٫۵۰	۴٫۴

برداشت

در بیناب سنجی موسباتر ^{57}Fe بررسی شد. بر اساس نتایج به- دست آمده از بهترین همخوانی در الگوهای موسباتر، افزایش میدان ابر ریز مغناطیسی و کاهش جابه‌جایی همیاری را می- توان به تغییر طول پیوند و هم‌ارزی ناشی از جانشانی یون بیسموت در ساختار YIG نسبت داد.

قدردانی

این مقاله حاصل از طرح پژوهشی است که با تصویب و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز اجرا گردیده است.

مراجع

[1] Ristic M., Nowik I., Popovic S., Felner I., Music S., "Influence of synthesis procedure on the

در این پژوهش برای آماده سازی نمونه‌های ($0.3, 0.2, 0.1$) از $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ (x = 0.1، 0.2، 0.3) از روش سل-ژل استفاده شدند و تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس ساختار اسپینلی نمونه‌ها را تایید کرد. همچنین افزایش پارامتر ثابت شبکه با در نظر گرفتن اختلاف شعاع یونی Bi^{3+} نسبت به Y^{3+} ، توضیح داده شد. بررسی چرخه‌های پسماند نشان داد که مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی تا $x = 0.1$ به مقدار بیشینه خود می- رسد و با افزایش بیشتر بیسموت روند کاهشی دارد. تغییر رفتار مغناطیسی نمونه‌ها به چیرگی اثر کاهشی ناشی از کج شدگی اسپینلی در زیر شبکه‌ها، به اثر افزایشی برهم‌کنش ابرتبادلی نسبت داده شد. همچنین اثر جانشانی در تغییر پارامترهای ابر ریز مغناطیسی با استفاده از مدل توزیع تصادفی یون‌های Bi^{3+}

- Prepared Via Sol Gel Technique*", American Journal of Applied Sciences 4 (2007) 80-84.
- [12] Pigošová J., Cigán A., Maňka J., "Thermal Synthesis of Bismuth-Doped Yttrium Iron Garnet for Magneto-Optical Imaging", Measurement science review 8 (2008) 126-128.
- [13] Fu Y.-P., Tsai F.-Y., "Nonisothermal Crystallization Kinetics of $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($0.25 < x < 1.00$) Prepared from Coprecipitation Process", Journal of the American Ceramic Society 91(2008) 1214–1217.
- [14] Wu Y.J., Fu H. P., Hong R.Y., Zheng Y., Wei D. G., "Influence of surfactants on co-precipitation synthesis of Bi-YIG particles", Journal of Alloys and Compounds 470 (2009) 497–501.
- [15] Lee H., Yoon Y., Kim S., Yoo H. K., Melikyan H., Danielyan E., Babajanyan A., Ishibashi T., F. Barry, Lee K., "Preparation of bismuth substituted yttrium iron garnet powder and thin film by the metal-organic decomposition method", Journal of Crystal Growth 329 (2011) 27–32.
- [16] Xu H., Yang H., Xu W., Yu L., "Magnetic properties of Bi-doped $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ nanoparticles", Current Applied Physics 8 (2008) 1-5.
- [17] Stročka B., Holst P., Toklisdorf W., "An empirical formula for the calculation of lattice constants of oxide garnets based on substituted yttrium- and gadolinium-iron garnets", Philips Journal of Research 33 (1978) 186-202.
- [18] Thongmee S., Winotai P., "Local field fluctuations in the substituted aluminum iron garnets, $\text{Y}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_{12}$ ", Solid State Communications 109 (1999) 471-476.
- [19] Kim T., Nasu S., Shima M., "Growth and magnetic behavior of bismuth substituted yttrium iron garnet nanoparticles", Journal of Nanoparticle Research 9 (2007) 737–743.
- [20] Liu Y. L., Mou D., Li X.Y., Zhang P.X., "Brillouin scattering from bismuth substituted yttrium iron garnet single crystals", IEE Transactions on Magnetics 23 (1987) 3329–3330.
- [21] Geller S., Williams H. J., Espinosa G. P., Sherwood R. C., and Gilleo M. A., "Reduction of 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] Menzer G., "Die kristall structure der granate", z. kristallogr 69 (1928) 300-396.
- [6] 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.
- [7] Ishibashi T., Mizusama A., Nagai M., Shimizu S., Sato K., Togashi N., Mogi T., Houchido M., Sano H., Kuriyama K., "Characterization of epitaxial (Y,Bi)₃(Fe,Ga)₅O₁₂ thin films grown by metal-organic decomposition method", Journal of Applied Physics 97 (2005) 013516-013516-4
- [8] Matsumoto K., Yamaguchi K., Fujii T., Ueno A., "Preparation of bismuth substituted yttrium iron garnet powders by the citrate gel process", Journal of Applied Physics 69 (1991) 5918-5920.
- [9] Zhao H., Zhou J., Bai Y., Gui Z., Li L., "Effect of Bi-substitution on the dielectric properties of polycrystalline yttrium iron garnet", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 280 (2004) 208–213.
- [10] Amighian J., Hasanpour A., Mozaffari M. "The effect of Bi mole ratio on phase formation in $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ nanoparticles", physica status solidi (c) 1(2004) 1769–1771.
- [11] Yahya N., Hean G. K., "High Saturation Induction for Bi-Substituted Yttrium Iron Garnet

[23] Chen, Y. L., Yang, D. P., "*Mossbauer Effect in Lattice Dynamics*", WILEY-VCH Verlag GmbH.KGaA, Weinheim and Co. KGaA (2007) 35-37.

the Preparation Temperature of Polycrystalline Garnets by Bismuth Substitution", Applied Physics Letters 3 (1963)21-22.

[22] Watsonr E., Freeman A. J., "*Origin of Effective Fields in Magnetic Materials*", Physical Review 123 (1961) 2027-2047.