



IRANIAN SOCIETY of
CRYSTALLOGRAPHY
and MINERALOGY

Vol. 12, No. 1, 1383/2004 Spring & Summer

IRANIAN JOURNAL OF
CRYSTALLOGRAPHY
and MINERALOGY

The use of mechanochemical processing in preparation of ultrafine Bi-substituted Yttrium Iron Garnet (Bi-YIG)

A. Hasanpour, J. Amighian, M. Mozaffari

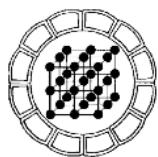
Department of Physics, University of Isfahan, Iran 81746-7344.

E-mail: jamighian@sci.ui.ac.ir

(received: 14/10/2003, received in revised form: 5/2/2004)

Abstract: In this work we have prepared nano-sized Bi-YIG powders, using mechanochemical processing. In this process, a part of the activation energy, which is necessary for chemical reactions, is provided by high-energy mills. The as milled powders obtained by this technique need a lower annealing temperature in comparison with those obtained by conventional ceramic technique to become a single phase garnet. The lower temperature itself can produce ultrafine powders by inhibiting grain growth. The optimum calcining temperature was 800 °C for 5 hours milling time, which is much lower than 1000°C needed in conventional ceramic technique. Longer milling times are not recommended, because it produces extra iron into the powders. The average particle size of the powders was in the range 50 to 60 nm, using Scherrer's formula. Room temperature saturation magnetizations of the samples were measured using a vibrating sample magnetometer (VSM). These were 0.022, 6, 17 and 20 emu/g for the samples annealed at 700, 725, 750 and 800 °C, respectively. The lower magnetization values respect to the conventional ceramic technique, are discussed according to core-shell model.

Keywords: *Mechanochemical processing, Nanoparticles, Substituted garnets, Calcining temperature, Saturation Magnetization*



کاربرد فرایند مکانوشیمیایی در تهیه پودرهای بس ریز گارنت ($\text{BiY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) ایتریوم آهن با جانشانی بیسموت

احمد حسن پور، جمشید عمیقیان، مرتضی مظفری

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

پست الکترونیکی: jamighian@sci.ui.ac.ir

(دریافت مقاله ۱۳۸۲/۷/۲۲ ، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۲/۱۱/۱۶)

چکیده: در این پژوهش پودرهای نانومتری گارنت ایتریوم-آهن با جانشانی بیسموت به کمک فرایند مکانوشیمیایی تهیه شد. در فرایند یاد شده بخشی از انرژی فعال سازی واکنش شیمیایی توسط آسیاب پر انرژی تأمین می‌شود. این امر موجب کاهش دمای تشکیل فاز و دستیابی به یک پودر تک فاز بس ریز می‌شود که مورد اخیر ناشی از محدود شدن رشد ذرات است. در این پژوهش بهترین دمای برشتن پس از ۵ ساعت آسیاب کاری در حدود 800°C به دست آمد. این دما در مقایسه با دمای تشکیل فاز مورد نظر در روش متداول سرامیکی، پایین‌تر است. اندازه میانگین ذرات بالستفاده از (SEM) و نیز از روی الگوی پراش پرتو ایکس در گستره ۵۰ تا ۶۰ نانومتر تخمین زده شد. مغناطش اشباعی در دمای اتاق نمونه‌ها با یک دستگاه مغناطش‌سنج ارتعاشی (VSM) اندازه‌گیری شد. مقادیر کوچکتر مغناطش اشباعی نمونه‌های تهیه شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده به روش متداول سرامیکی بر اساس نظریه هسته-پوسته مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: فرایند مکانوشیمیایی، ذرات نانومتری، گارنتهای جانشانی شده، دمای برشتن، مغناطش اشباعی.

مقدمه

امروزه ذرات مغناطیسی نانومتری به خاطر تک حوزه‌ای بودن، در پژوهش‌های فیزیک ماده چگال جایگاه ویژه‌ای دارند. اندازه کوچک این ذرات موجب پیدایش اثرهای کوانتمی اندازه، و تولید زنی مغناطیسی می‌شود [۱]. از دیدگاه کاربردی نیز این مواد در ذخیره‌سازی اطلاعات به روش مغناطیسی یا مغناطواپتیکی، به منظور افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، اهمیت فراوان دارند [۲ و ۳]. گارنت ایتریوم- آهن (YIG)^۱ با فرمول شیمیایی $\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ دارای ساختار مکعبی است که با کانی گراسولاریت (گارنت طبیعی با فرمول شیمیایی $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}$) هم ساختار است. هر یاختهٔ مغناطیسی (YIG) شامل هشت فرمول شیمیایی (با ۱۶۰ اتم) است که در آن یونهای اکسیژن جایگاههای بلورین (۹۶h) را اشغال می‌کنند و یک ساختار مکعبی مرکز حجمی (bcc) را تشکیل می‌دهند. یونهای مغناطیسی آهن در بیست و چهار جایگاه چهاروجهی (۲۴d) و شانزده جایگاه هشت وجهی (۲۴a) قرار می‌گیرند و یونهای نامغناطیسی ایتریوم- آهن، مغناطش جایگاههای a و d به طور پادفرومغناطیسی جفت می‌شوند، گشتاور برایند (YIG) در صفر کلوین برابر با $5\mu\text{B}$ است. برهم‌کنش آنهای این دو جایگاه غیرمستقیم بوده و از طریق یونهای اکسیژن (O^{2-}) انجام می‌گیرد که به آن برهم‌کنش ابر تبادلی^۲ گویند.

هنگامی که جایگاههای دوازده وجهی (c) با یونهای مغناطیسی پر شوند، گشتاور مغناطیسی این یونها با برایند گشتاور جایگاههای a و d نیز پادفرومغناطیسی جفت می‌شوند. در این حالت مغناطش کل گارنت از رابطه $M_s = (M_d - M_a) - M_c$ به دست می‌آید، که در آن M_d ، M_a و M_c به ترتیب مغناطش زیر شبکه‌های چهار وجهی، هشت وجهی و دوازده وجهی است. گلر و همکارانش نشان دادند که یون نامغناطیسی بیسموت (Bi^{3+}) با پیکربندی الکترونی ($6S^1$) در ساختار گارنت ایتریوم- آهن، جانشین یون ایتریوم در جایگاههای دوازده وجهی (c) می‌شود [۳]. از این رو، گشتاور مغناطیسی برایند گارنت ایتریوم- آهن جانشانی شده با بیسموت (Bi-YIG) در صفر کلوین همانند ترکیب اصلی (YIG) برابر $5\mu\text{B}$ است. گارنت Bi-YIG یکی از پرکاربردترین مواد مغناطیسی در ساخت دیسکها و دستگاههای نمایشگر مغناطواپتیکی است [۲]. پودرهای نانومتری این ترکیب را می‌توان به روش‌های گوناگون شیمیایی، مثل همرسوبی [۴]، پیرولیز [۵]، سلزل [۶]، رسوب‌گیری همگن [۷]، آلکوکسید

1- Yttrium Iron Garnet

2- Superexchange interaction

[۸] و گرمایی [۹] تهیه کرد. به تازگی فرایند مکانوشیمیایی^۳، که در آن بخشی از انرژی فعال سازی واکنش به وسیله آسیابهای پر انرژی تأمین می شود [۱۰]، کاربرد فراوانی در تولید پودرهای نانومتری پیدا کرده است [۲ و ۱۱]. در این پژوهش با استفاده از فرایند مکانوشیمیایی پودرهای نانومتری تکفاز گارنت $\text{BiY}_x\text{Fe}_8\text{O}_{12}$ در دمائی بسیار پایین تر از روش متداول سرامیکی تهیه شد.

روش آزمایش

برای تهیه نمونه ها از مواد اولیه آزمایشگاهی شامل اکسیدهای ایتریوم (Y_2O_3)، آهن (Fe_2O_3) و بیسموت (Bi_2O_3) از محصولات شرکت مرک آلمان با خلوص حداقل ۹۹ درصد استفاده شد. این مواد به ترتیب با نسبتهای مولی ۲، ۴/۷۵ و ۱ توزین و سپس با یک دستگاه آسیاب پر انرژی SPEX 8000D در زمانهای گوناگون از ۱ تا ۲۰ ساعت با سامد ۱۰۰۰ rpm آسیاب شد. دلیل انتخاب نسبت مولی ۴/۷۵ به جای ۵ برای اکسید آهن، جلوگیری از افزایش نسبت استوکیومتری آن در مخلوط نهایی به خاطر سایش گلوله های فولادی در این فرایند است. این نسبت با روش سعی و خطا طوری تعیین شد که به یک ترکیب موازنۀ شیمیایی تک فاز منجر شود. نسبت جرم مواد به جرم گلوله ها ۱ به ۷ انتخاب گردید. حجم ظرف آسیاب ۸۰ میلی لیتر و از ۳ گلوله فولادی به قطر ۱۲/۸ و ۴ گلوله فولادی به قطر ۵ میلی متر استفاده شد. پس از آسیاب، برای به دست آوردن یک نمونه تک فاز پودرهای آسیاب شده تحت عملیات گرمایی قرار گرفتند. به این منظور از یک دستگاه کوره الکتریکی خودکار و قابل برنامه ریزی ساخت شرکت Nabertherm آلمان استفاده شد. آهنگ گرمایش برای همه نمونه ها ۵ °C/min و دمای برشتن در گستره ۷۰۰ تا ۹۰۰ °C زمان برشتن ۳ ساعت انتخاب شد. برای سرد شدن برنامه ای در نظر گرفته نشد تا نمونه ها همراه با کوره آزادانه تا دمای اتاق سرد شوند. برای شناسایی فازهای بلوری موجود در نمونه های آسیاب شده و برشه شده در دماهای مختلف، از یک دستگاه پراش سنج پرتو ایکس (XRD) ساخت شرکت فیلیپس مدل Pert' استفاده شد. با استفاده از الگوهای پراش پرتو ایکس پهن شدگی در نصف شدت بیشینه (B_1) اندازه گیری و به کمک رابطه شر اندازه میانگین ذرات پودری محاسبه گردید. برای این منظور، از یک الگوی کمکی با فرمول شیمیایی همسان ولی کپهای^۴ نیز استفاده شد تا تصحیح لازم در پهن شدگی قله های پراش، ناشی از نقطه ای نبودن چشم و نیز واگرایی پرتوها و تک فام نبودن

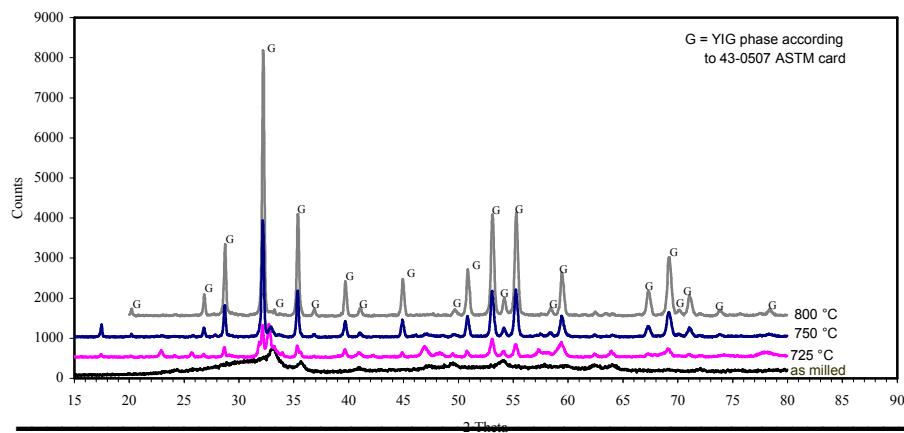
3- Mechanochemical Processing (MCP)

4- Bulk

آنها انجام شود. به این ترتیب، با استفاده از رابطه شر ($t = 0.9\lambda/(B \cos \theta)$)، که در آن θ نیم زاویه پراش، B پهن شدگی در نصف شدت بیشینه و λ طول موج پرتو X است) اندازه میانگین ذرات (t) محاسبه شد. در صورتی که اندازه ذرات بیش از ۱۰۰۰ نانومتر باشد، مقدار پهن شدگی ناشی از اندازه ذره صفر خواهد شد ولی پهن شدگی به خاطر سایر عوامل (B_0) بر جای خواهند ماند. در اینجا ما با استفاده از یک نمونه کمکی با اندازه میانگین بیش از ۱۰۰۰ نانومتر، B_0 را به دست آورده و سپس با به کارگیری رابطه $B^2 = B_1^2 - B_0^2$ ، مقدار B ناشی از اندازه ذرات نمونه را محاسبه و برای به دست آوردن اندازه ذرات آن را در فرمول شر قرار دادیم [۱۲]. علاوه بر این، اندازه ذرات با میکروسکوپ الکترونی (SEM) نیز اندازه گیری شد. مغناطش اشعاعی در واحد جرم نمونه ها در دمای اتاق 5°C به وسیله یک دستگاه مغناطش سنج ارتعاشی^۵ اندازه گیری شد.

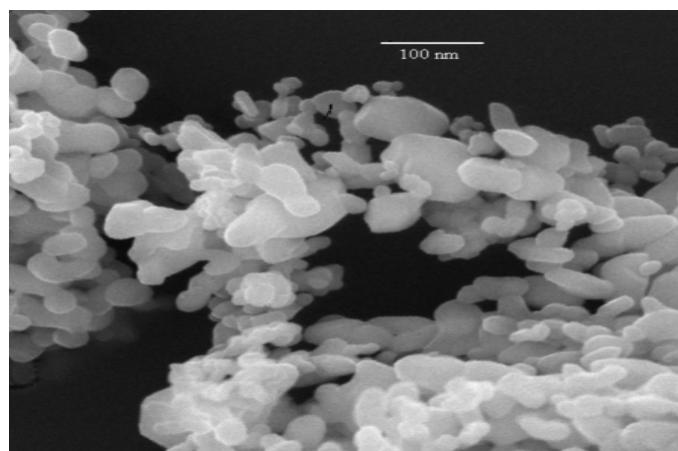
بحث و برداشت

الگوهای XRD پودر آسیاب شده و پودرهایی که تا دمای 700°C برداشته شده اند نشان داد که فاز گارنتی تا این دما تشکیل نشده است. ولی چنانکه در شکل ۱ دیده می شود، فاز مذکور در پودرهایی که در دمای بالاتر برداشته شده اند شروع به تشکیل شدن کرده و سرانجام در 800°C کامل می شود. اندازه میانگین ذرات پودر تک فاز گارنت بیسیمومتی به دست آمده با استفاده از رابطه شر تعیین شد که در گستره ۵۰ تا ۶۰ نانومتر بود. این نتیجه با اندازه ذرات در تصاویر SEM، که یک نمونه از آنها در شکل ۲ نشان داده شده است، همخوان است.



5- Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

شکل ۱ الگوهای پراش پرتو X پودرهای آسیاب شده و برشته شده در دماهای ۷۲۵، ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد.



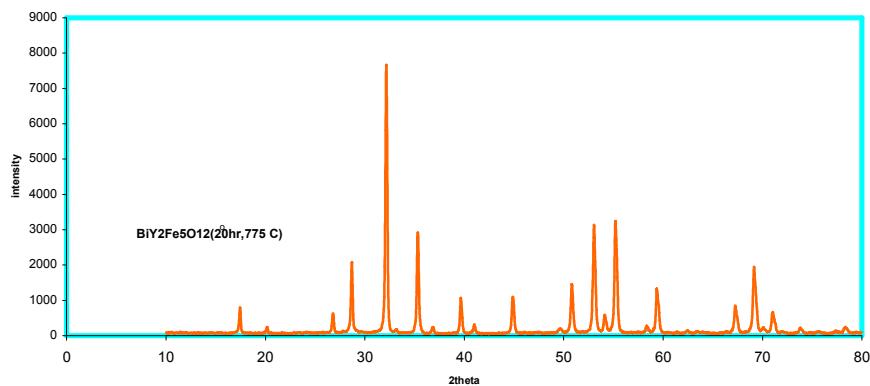
شکل ۲ تصویر میکروسکپ الکترونی از پودر برشته شده در دمای ۸۰۰°C.

الگوی XRD پودر آسیاب شده به مدت ۲۰ ساعت و برشته شده در دمای ۷۷۵°C در شکل ۳ نشان می‌دهد که فاز گارنتی به طور کامل تشکیل شده است. با توجه به زمان طولانی آسیاب و سایش بیش از حد ظرف و گلوله‌های آسیاب و در نتیجه افزایش آلودگی ناشی از آن، انجام این کار پیشنهاد نمی‌شود. مغناطش اشباعی نمونه‌ها در دمای اتاق برای نمونه‌های برشته شده در دماهای ۷۰۰، ۷۲۵، ۷۵۰ و ۸۰۰°C به ترتیب برابر ۰/۰۲۲، ۶، ۱۷ و ۲۰ emu/g به دست آمد (شکل ۴). مقدار ناچیز مغناطش در دمای ۷۰۰°C که با مقیاس شکل قابل نمایش نیست به دلیل عدم تشکیل فاز گارنت است و با نتایج مطالعات پراش پرتو ایکس نیز همخوانی دارد. مغناطش نمونه‌های برشته شده در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰°C به گونه چشمگیری از مغناطش نمونه برشته شده در دمای ۷۰۰°C بزرگتر است. با وجود به اشباع رسیدن منحنیهای مغناطش نمونه‌های برشته شده در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰°C، مقادیر به دست آمده برای این

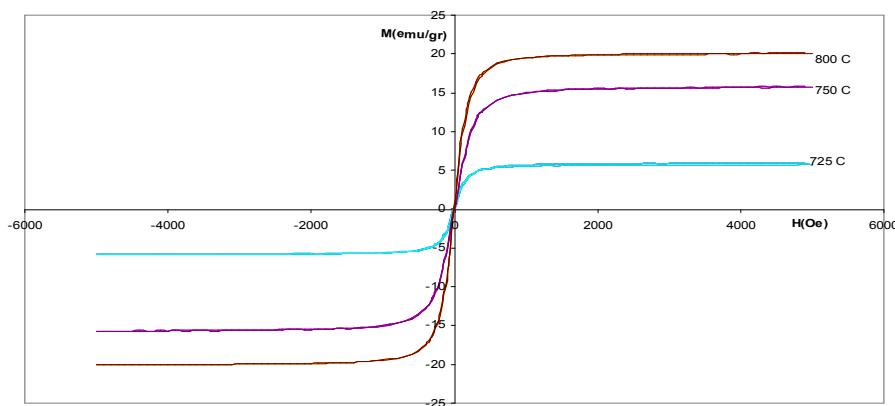
نمونه‌ها، یعنی ۱۷ و ۲۰ emu/g، تا رسیدن به مقدار ۲۵ emu/g مربوط به پودرهای تهیه شده به روش متداول سرامیکی فاصله زیادی دارد. این مقدار کاهش در مغناطش اشباعی می‌تواند ناشی از بی‌نظلمی گشتاورها در لایه سطحی ذرات ریز باشد. زیرا در لایه سطحی به خاطر تغییر شرایط محیطی و کرنشهای ناشی از ضربه گلوله‌ها به هنگام آسیاب کردن، نظم موجود در همسایگی هر یک از کاتیونها و نیز فاصله‌های برهمنکشهای ابر تبادلی آنها دچار اختلال می‌شود و در نتیجه گشتاور مغناطیسی بلورکهای روی سطح، نسبت به راستای میدان برایند، زاویه‌های دلخواهی اختیار می‌کنند که منجر به تشکیل یک لایه اسپین-شیشه در اطراف هسته خواهد شد. با فرض این که پوسته فاقد مغناطش ذاتی و دارای ضخامت ثابت بوده، و مغناطش هسته آن با مغناطش ماده کپهای برابر باشد، آنگاه مغناطش ذرهای کروی با قطر هسته D و ضخامت پوسته t از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱] :

$$M_S = M_{S0} \left\{ \frac{(D - 2t)^3}{D^3} \right\} \Rightarrow M_S^3 = M_{S0}^3 \left\{ 1 - \frac{2t}{D} \right\}$$

که در آن M_{S0} مغناطش حالت کپهای است. این رابطه نشان می‌دهد که هر چه D کوچکتر باشد، مقدار مغناطش اشباعی M_S نیز کاهش می‌یابد که با نتایج به دست آمده در اینجا سازگار است.



شکل ۳ الگوی پراش XRD نمونه‌ای که ۲۰ ساعت آسیاب شده و در دمای ۷۷۵°C برداشته شده است.



شکل ۴ چرخه‌های پسماند نمونه‌های برشته شده در دماهای ۷۰۰، ۷۲۵، ۷۵۰ و ۸۰۰ °C

سپاسگزاری

نویسنندگان وظیفه خود می‌دانند که از زحمات سرکار خانم صرامی از بخش XRD دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان و نیز از پروفسور L. Grace از بخش فیزیک دانشگاه ملی تایوان (National Taiwan University) به خاطر اندازه‌گیریهای XRD و VSM سپاسگزاری نمایند.

مراجع

- [1] Zhang X.X., Ziolo R., Kroll E.C., Bohigas X.J., J. Magn. Magn. Mater., 140-144 (1995) 1853. Tejada,
- [2] Kawai N., Komuro E., Namikawa T., Yamazaki Y., IEEE Magn., 30, No.6 (1994) 4446.
- [3] Geller S., Williams H.J., Espinosa G.P., Sherwood R.C., Gilleo M.A., Appl. Phys. Lett., 3 (1963) 21.
- [4] Vaqueiro P., Lopez-Quintela M.A., Rivas G., J. Mater. Chem., 7 (1997) 501.
- [5] Matsumoto K., Yamanobe Y., Sasaki S., Fuji T., J. Appl. Phys., 70 (1999) 5912.

- [6] Vaqueiro P., Crosnier-Lopez M.P., Lopez-Quintela M.A., J. Solid State Chem. 126 (1996) 161.
- [7] Ahn S., Han M.H., J. Mater. Sci. 31 (1996) 433.
- [8] Taketomi S., Kawasaki K., Ozaki Y., Yuasa S., Otan Y., Miyajima H., J. Amer. Ceram. Soc. 77 (1994) 1787.
- [9] Cho Y.S., Butifvk V.L., Amarakoon V.R.W., J. Amer. Ceram. Soc., 80 (1997) 1605.
- [10] Ding J., Maurice D., Miami W.F., McCormick P.G., Street R., J. Magn. Magn. Mater., 150 (1995) 417.
- [11] Muroi M., Street R., McCormick P.G., Amighian J., Phys. Rev. B, 63 (2001) 184414.
- [12] Cullity B.D., “*Elements of X-ray Diffraction*”, John-Wiley&Sons (1974).
- [13] Ichinose N., “*Superfine particle technology*”, Springer (1992).