بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مشخصه‌یابی فیلم‌های نازک گارنت مغناطیسی Bi:YIG ساخته شده به روش سل-ژل

فرناز طاهونی و مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانو مغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده –لایه نازک $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ با (۳-۰) =X به روش شیمیایی سل-ژل و با تکنیک لایه‌نشانی چرخشی تهیه شده است. خشک‌سازی و بازپخت نمونه‌های تولید شده به ترتیب در دمای ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. با اندازه‌گیری اثر فاراده برای فیلم‌ها، مشاهده شد که خواص مگنتواپتیکی با افزایش بیسموت جایگزین شده بهبود می‌یابد، به طوریکه فیلم حاوی بیسموت با مقدار x=۱/۵ بیشینه پاسخ‌دهی مغناطیسی را از خود نشان داد. با افزایش بیسموت جایگزین شده مغناطش اشباع ماده و نیز چرخش فاراده آن افزایش می‌یابد که برای فیلم گارنت با x =۱/۵ چرخش فاراده ویژه در حدود ۱/۱۳ درجه به ازای یک میکرومتر حاصل شد.

کلید واژه- گارنت آهن جایگزین شده با بیسموت، لایه نازک، سل-ژل، لایه‌نشانی چرخشی

Characterization of Bi:YIG thin films prepared using sol-gel method

Farnaz Tahooni and Majid Ghanaatshoar

Laser and plasma research institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, we have prepared $Bi_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ thin films with x=0-3 by sol gel method and spin coating technique. The produced thin films dried at 400 ºC then annealed at 700 ºC for 2 hours in air. By measuring the Faraday effect of thin films, it was shown that the magnetic response of films increases with the amount of bismuth so the best amount was x=1.5. The saturation magnetization and Faraday rotation of the films increase with the amount of doping, so the special Faraday rotation of garnet film with x=1.5 was obtained as 1.13 deg/µm.

Keywords: Bi:YIG, magnetic garnets, Sol gel, thin film.

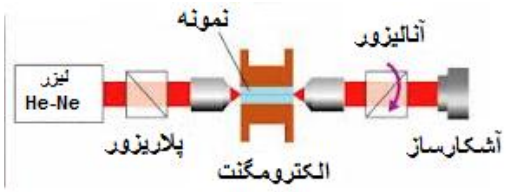
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

علم مگنتواپتیک به خاطر توسعه گسترده انواع لیزرها با توان و طول‌موج‌های مختلف و دیگر ابزارهای مگنتواپتیکی و به خاطر سهولت در ایجاد میدان‌های مغناطیسی متناوب و مستقیم کاربردهای فراوانی در صنعت پیدا کرده است. از این رو گارنت‌های مغناطیسی $Y_{3-x}A_xFe_5O_{12}$ که A می‌تواند Bi، Ga و یا یکی از عناصر گروه لانتانیدها باشد، به خاطر خواص مگنتواپتیکی جالب خود کاربرد وسیعی در ابزارهای الکترونیکی مانند چرخاننده‌ها، موجبرها، ایزولاتورها و ابزارهای مگنتواپتیکی پیدا کردند. اولین بار در سال ۱۹۷۵، ویته‌کوک و همکارانش [۱] افزایش چرخش فاراده را با جایگزینی مقداری بیسموت در گارنت YIG گزارش کردند. از آن به بعد گارنت Bi:YIG به خاطر چرخش فاراده بزرگ، جذب پایین و عبور بالا در ناحیه مرئی و مادون قرمز مورد توجه زیادی قرار گرفت. مهمترین ویژگی آن چرخش فاراده بزرگ است که به وسیله برهمکنش اسپین-مدار بزرگ شکل گرفته بین اوربیتال 3d در Fe^{3+} و اوربیتال 2p در O^{2-} با اوربیتال 6p در Bi^{3+}، حاصل می‌شود. علاوه بر آن با جایگزینی بیسموت در گارنت YIG دمای بلوری شدن ماده بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد [۲].

روش‌های مختلفی برای ساخت لایه‌های نازک وجود دارد که برای تولید فیلم‌های گارنت نیز بکار گرفته می‌شوند. که از آن جمله می‌توان به روش‌های متداول لایه‌نشانی پالس لیزری، روش کند و پاش، تبخیر شیمیایی، رونشستی فاز مایع و سل-ژل اشاره کرد.

در این کار، فیلم‌های Bi:YIG با استوکیومتری‌های مختلف از عناصر تشکیل‌دهنده آن توسط روش سل-ژل و تکنیک لایه‌نشانی چرخشی تهیه شده و خواص مگنتواپتیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان انتخاب روش سل-ژل به خاطر ارزان بودن، سروکار داشتن با ترکیب مقیاس اتمی و نرخ برهم‌کنش بالای عناصر بوده است. همگنی بالای محلول استفاده شده در این روش موجب ساخت فیلم نازک با کیفیت سطحی بالا می‌شود که در تهیه فیلم نازک از اهمیت به سزایی برخوردار است.



شکل ۱ : چیدمان اثر مگنتواپتیکی فاراده.

۲- بخش تجربی

مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت گارنت Bi:YIG نیترات یتریم شش آبه، نیترات آهن نه آبه، نیترات بیسموت پنج آبه و اتیلن گلیکول است که از استوکیومتری‌های مختلف نیترات فلزات برای تهیه محلول‌های $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با x=(۰-۳) استفاده شده است. در اینجا حلال مورد استفاده برای ساخت محلول، اتیلن گلیکول است که البته حلال-های دیگری را نیز می‌توان به کار برد. پس از ترکیب مواد اولیه، محلول به مدت ۴۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی با اعمال دمای ۸۰ درجه قرار می‌گیرد به طوری‌که یک محلول شفاف و یک‌دست به‌دست آید که به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز است. پس از ساخت محلول از تکنیک لایه-نشانی چرخشی برای لایه‌نشانی استفاده شد که این کار با سرعت‌های چرخش مختلف و بر روی زیرلایه‌های متفاوت صورت گرفت. سرعت چرخش به کار برده شده برای ساخت این فیلم ۳۵۰۰ دور بر دقیقه است و به خاطر نیاز به دمای بالا برای بازپخت نمونه‌ها، فیلم بر روی زیرلایه کوآرتز لایه‌نشانی شد. بعد از لایه‌نشانی، خشک‌سازی نمونه‌ها در یک طیف دمایی پایین صورت گرفت و به خاطر آمورف بودن نمونه‌ها بعد از خشک‌سازی، بازپخت نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام شد.

جهت مطالعه خواص اپتیکی و تعیین ثابت‌های اپتیکی نمونه‌ها از دستگاه طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی-مادون قرمز نزدیک (۱۱۰۰-۱۷۶ نانومتر) استفاده شد. خواص ساختاری فیلم‌ها با استفاده از پراکندگی اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت و نیز اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نمونه‌ها نیز با استفاده از چیدمان فاراده در آزمایشگاه انجام شد که نمایی از آن در شکل ۱ آمده است.

۳- نتایج

در این مقاله فیلم گارنت $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با استفاده از روش سل-ژل و تکنیک لایه‌نشانی چرخشی ساخته شد که با انتخاب استوکیومتری‌های مختلف برای یتریم و

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

بیسموت، بهترین پاسخ مغناطیسی برای نسبت ۱:۱ بدست آمد. برای به دست آوردن کیفیت مناسب از دو دمای ۱۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد بر اساس منحنی‌های DTA و TGA که در مقالات گزارش شده است برای خشک‌سازی نمونه و دمای بالای ۶۰۰ درجه برای بازپخت نمونه استفاده شد [۳]. برای تعیین ثابت‌های اپتیکی ماده از طیف‌سنجی استفاده شد که طیف عبوری نمونه برای مقدار ناخالصی‌های مختلف در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در شکل ۲ آورده شده است. بر اساس طیف عبوری نمونه و با بکارگیری روابط مقدماتی اپتیک حاکم بر مواد شفاف و لایه‌های نازک ضریب شکست لایه در هر مرحله به شکل زیر محاسبه شد [۴] :

$$n=[N+(N^2-n_s^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱)$$

که در آن n_s ضریب شکست زیرلایه است و N از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N=2n_s\frac{T_M-T_m}{T_M+T_m}+\frac{n_s^2+1}{2} \quad . \qquad (۲)$$

T_M و T_m به ترتیب پوش بیشینه‌ها و کمینه‌ها در طیف عبوری هستند. ضخامت و ضریب جذب نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند:

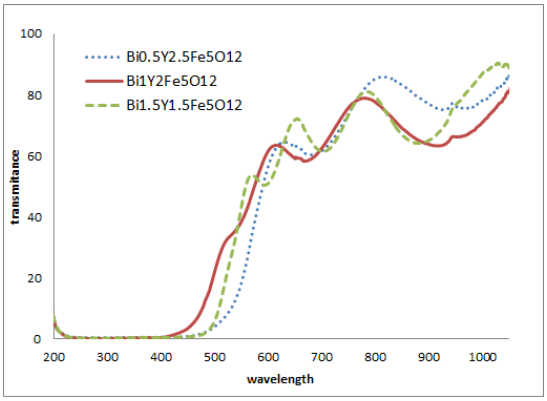
$$t=\frac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 n_2-\lambda_2 n_1)} \quad . \qquad (۳)$$

و

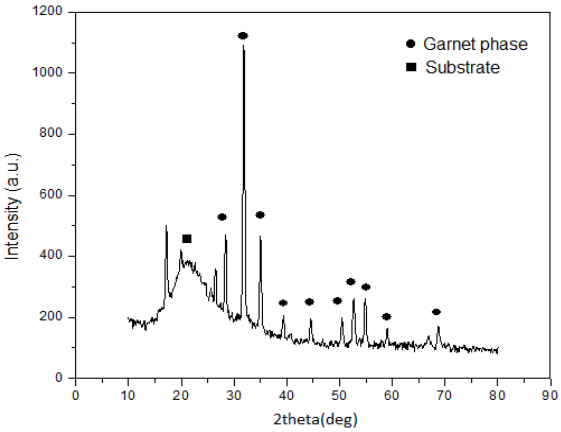
$$\alpha=-\frac{1}{t}\ln\frac{(n-1)(n-n_s)\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}+1\right)^{0.5}}{(n+1)(n+n_s)\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}-1\right)^{0.5}} \quad . \qquad (۴)$$

با استفاده از روابط ۴-۱ ضخامت فیلم‌ها در حدود ۲ میکرومتر به‌دست آمد. با سرعت‌های چرخشی مختلف ضخامت‌های متفاوتی برای هر تک‌لایه (در مقیاس نانومتر)، حاصل می‌شود که سرعت چرخش ۳۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه برای این لایه‌نشانی انتخاب شد و هر فیلم ۵ بار لایه‌نشانی شد.

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که نمونه‌های تولید شده، تراگسیل خوبی در ناحیه مرئی و مادون قرمز دارند. با توجه به نمودار بالا ضریب شکست فیلم‌های گارنت به ترتیب ۱/۸۵۵، ۱/۸۳۷ و ۱/۷۱۴ به ازای ۰/۵، ۱، ۱/۵=x به دست می‌آید به طوریکه کمترین ضریب جذب برای



شکل ۲: طیف تراگسیل فیلم‌های نازک گارنت بازپخت شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس.



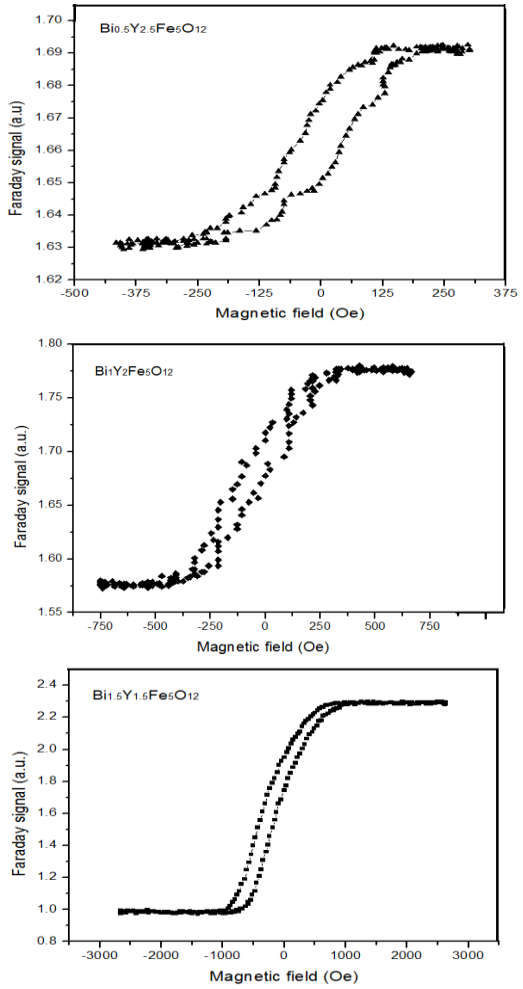
شکل ۳: طیف پراش اشعه ایکس فیلم نازک $Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_5O_{12}$ در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس.

فیلم $Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_5O_{12}$ برابر با ۱/۳۸۵ μm^{-1} حاصل می‌شود.

شکل ۳ الگوی پراکندگی پراش ایکس را برای فیلم $Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_5O_{12}$ نشان می‌دهد. بر اساس آن در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس، فاز گارنت به طور کامل شکل می‌گیرد و فازهای ناخالصی ظاهر نمی‌شوند که با گزارشات داده شده در مقالات مطابقت دارد [۵].

با توجه به این نکته که مقدار اثر فاراده به بزرگی و جهت مغناطش ماده بستگی دارد، با اندازه‌گیری اثر فاراده و استفاده از حلقه پسماند مغناطیسی می‌توان مقدار مغناطش اشباع (M_s)، نیروی وادارندگی (H_c) و میدان اشباع (H_s) را محاسبه کرد. از این رو در اینجا از روش مغناطیس‌سنجی نوری که قابلیت اندازه‌گیری اثر فاراده با ایجاد کمترین اختلال در فرآیند رشد و بطور همزمان را داراست، استفاده شده است. شکل ۴ پسماند مغناطیسی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل ۳: نمودار حلقه پسماند مغناطیسی فیلم‌های نازک گارنت در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس.

فیلم‌های گارنت $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ با ناخالصی‌های مختلف و در دمای ۷۰۰ ^oC را نشان می‌دهد. بر اساس این پسماند-ها، با افزایش مقدار ناخالصی و تشکیل ترکیبات مغناطیسی با فاز نرم، ماده از لحاظ مغناطیسی نرم‌تر می-شود به طوریکه مغناطش اشباع ماده افزایش می‌یابد. بیشینه چرخش فاراده برای گارنت $Y_{1.5}Bi_{15}Fe_5O_{12}$ حاصل شد که در طول موج ۶۳۳ نانومتر برابر با ۱/۱۳ درجه به ازای یک میکرومتر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نسبت به گزارشاتی که تا کنون داده شده است نتیجه بهتری به حساب می‌آید [۵،۶].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله فیلم نازک Bi:YIG با مقادیر متفاوتی از بیسموت به عنوان ناخالصی ساخته و بررسی شد. در مقایسه با نمونه‌های دیگر، فیلم $Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_5O_{12}$ چرخش فاراده بزرگ و مغناطش اشباع بالاتری دارد. تشکیل ساختار گارنت کامل و عدم وجود ناخالصی به همراه تراگسیل بالا، این فیلم را کاندیدای مناسبی برای استفاده در ابزارهای مگنتواپتیکی می‌سازد.

مراجع

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

[2] B. Dong, H. Yang, Y. Cui, L. Yu, Sh. Feng, *The magnetic properties of BiY2Fe5O12 nanoparticles doped with Cr ions*, **J Mater Sci**, 42 (2007) 3167-3171.

[3] B. Dong, H. Yang, L. Yu, Y. Cui, W. Jin, Sh. Feng, *The synthesis and the magnetic properties of SmxBiY2–xFe5O12 nanoparticles*, **J Mater Sci**, 42 (2007) 5003–5006.

[4] J.-L. Rehspringer, J. Bursik, D. Niznansky, A. Klarikova, *Characterisation of bismuth-doped yttrium iron garnet layers prepared by sol-gel process*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 211 (2000) 291- 295.

[5] S. Ilican, M. Caglar, Y. Caglar, *Determination of the thickness and optical constants of transparent indium-doped ZnO thin films by the envelope method*, **Materials Science-Poland**, 25 (2007) 709-718.

[6] K. Matsumoto, K. Yamaguchi, A. Ueno, and T. Fujii, *Preparation of Bi-Substituted YIG Garnets by Sol-Gel Synthesis and Their Magnetic Properties*, **IEEE Translation Journal On magnetics,** , 6 (1991) 15-22.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]