اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش لایه نازک فریت کبالت به روش انحراف‌سنجی اپتیکی طرّه

جعفر جهانبخش[۱]؛ علی آفتابی[۲]، زهرا سادات عزیزی[۱]، محمدمهدی طهرانچی[۱و۲]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی ، ولنجک ، تهران

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده لایه‌های نازک با خاصیت مغناطوتنگشی در ساخت حسگرها، حافظه‌های مغناطیسی، تولید و آشکارسازی امواج فراصوتی جهت به کارگیری در ردیاب‌ها و تصویربرداری‌های فراصوتی، مشخصه‌یابی این لایه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این پژوهش روشی ساده و دقیق جهت اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش لایه‌های نازک مغناطیسی ارائه شده است.برای این منظور،لایه‌ی نازک فریت کبالت، به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد به کار گرفته شده در ساخت حسگرهای مغناطوکشسان، بر روی زیرلایه طره‌ای شکل از جنس شیشه لایه‌نشانی شد. به منظور اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش از روش انحراف‌سنجی اپتیکی طرّه استفاده شد. در این روش طرّه در معرض میدان مغناطیسی خارجی قرار می گیرد. به دلیل غیرمغناطیسی بودن زیرلایه و انبساط یا انقباض لایه مغناطسی با اعمال میدان مغناطیسی، طرّه از حالت اولیه خود منحرف می‌شود. با اندازه گیری مقدار این انحراف به روش اپتیکی ضریب مغناطوتنگش بدست می‌آید. این روش در مقایسه با سایر روش‌های به کارگرفته شده برای اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش لایه‌های نازک آسان، کم هزینه و دقیق است.

Measurement of Magnetostriction Coefficient of Cobalt Ferrite Thin Film with Optical Deflectometry of Cantilever

Jafar Jahanbakhsh[1], Ali Aftabi[2], Zahra Sadat Azizi[1], Mohammad Mehdi Tehranchi[1, 2]

[1]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran
[2]Departman of physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

Due to the widespread use of magnetostrictive thin films in sensors, magnetic storages, production and detection of ultrasonic waves, for ultrasonic detectors and imaging, characterization of these materials is very important issue. In this research, a simple and accurate method for measurement of the magnetostriction coefficient of thin films has been provided. First, a thin film of cobalt ferrite, as one of the most applicative materials used in the magntoelastic sensors, was deposited on a cantilever shape glass substrate. In order to measure the magnetostriction coefficient, optical deflectometry of cantilever method was used. In this method, the cantilever was exposed to an external magnetic field. Due to the non-magnetic substrate and also due to the expansion or contraction of magnetic film, the cantilever was deflected from its original state when a magnetic field was applied. By optically measuring the amount of deflection, magnetostriction coefficient would be obtained. This method compared with other employed methods is easy, low-cost and accurate.

PACS number: 75

مقدمه

تبدیل انرژی مغناطیسی به مکانیکی و بالعکس، به سبب کاربردهای گسترده در ساخت حسگرها، مولّدها و حافظه‌های مغناطیسی، همواره مورد توجه صنعت‌گران و پژوهشگران بوده است [۱]. یکی از پل‌های ارتباطی میان این دو انرژی ویژگی مغناطوتنگشی مواد مغناطیسی است. ویژگی مغناطوتنگشی سبب می‌شود زمانی که ماده در معرض میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، با توجه به جفت‌شدگی اسپین–مدار، حوزه‌های مغناطیسی حرکت کنند و در پی آن ابعاد ماده تغییر می‌کند و بالعکس زمانی که ماده مغناطیسی تحت تنش خارجی قرار می‌گیرد مغناطش آن تغییر می‌کند [۲]. برای مشخصه‌یابی این مواد ضریب مغناطوتنگشی به صورت نسبت تغییر طول ماده در اثر اعمال میدان مغناطیسی به طول اولیه ماده

($\lambda = \frac{\Delta l}{l}$) تعریف می‌شود که می‌تواند مثبت یا منفی باشد [۳]. این خاصیت به صورت گسترده در ساخت حسگرها و محرّک‌ها در صنایع خودروسازی و فضایی برای کنترل ارتعاشات و تنش‌های احتمالی به کار گرفته می‌شوند[٤]. به‌علاوه، این مواد در تولید و آشکارسازی امواج صوتی جهت ساخت ردیاب و دستگاه‌های تصویربرداری فراصوتی به کار گرفته می‌شوند [۵]. برای بهره برداری از این کاربردها نیاز به مواد مغناطوتنگشی با ضریب مغناطوتنگشی بالاست. در بین عناصر مغناطیسی کبالت بیشترین ضریب مغناطوتنگشی را دارد که برای حالت توده‌ای ٦۰ ppm- و برای حالت لایه نازک ۲۰ppm- گزارش شده است [٦و۷]. در بین آلیاژهای فلزی بیشترین ضریب مربوط به ترفنول دی[۱] ($Tb_xDy_{1-x}Fe_2$) است که برای حالت توده‌ای و لایه نازک به ترتیب ۲۰۰۰ppm و ۵۵۰ppm می‌باشد [۸و۹]. در بین مواد سرامیکی فریت کبالت ($CoFe_2O_4$) بیشترین ضریب مغناطوتنگش را داراست. این ماده به دلیل مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، تولید آسان و مقرون به صرفه بودن، در مقایسه با ترفنول دی، برای کاربردهای گوناگون کارآمدتر است [۱۰]. گزارش‌های متعددی برای اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش فریت کبالت در حالت توده‌ای و نانوذرات ارائه شده است که مقادیر تقریبی ۲۰۰ppm- برای حالت توده‌ای [۱۱] و ۱۱۰ppm- برای نانوذرات [۱۲] به دست آمده است. با توجه به روند مینیاتور سازی ادوات الکترونیکی استفاده از لایه‌های نازک مواد مغناطوتنگشی جهت کاربردهای ذکر شده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از آنجا که تاکنون تنها یک گزارش در راستای اندازه‌گیری ویژگی مغناطوتنگشی لایه نازک فریت کبالت ارائه شده است [۱۳] بر آن شدیم که پس از تهیه لایه نازک فریت کبالت به یک روش مناسب جهت اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگشی لایه نازک دست یابیم. روش‌های اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش را می‌توان به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. در روش‌های مستقیم با اعمال میدان مغناطیسی تغییر طول ماده اندازه‌گیری می‌شود و ضریب مغناطوتنگش به صورت تابعی از میدان خارجی به دست می‌آید. در روش‌های غیرمستقیم ضریب مغناطوتنگش تنها در حالت اشباع به دست می‌آید در حالی که روش‌های مستقیم امکان اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش در میدان های مغناطیسی گوناگون را فراهم می‌سازند. از بین روش‌های مستقیم می‌توان به روش کرنش‌سنجی، روش خازنی و روش انحراف‌سنجی طرّه اشاره کرد [١٤]. در روش انحراف‌سنجی طرّه از تکنیک‌های گوناگونی مانند پیروالکتریک، پیزومقاومت، تداخل‌سنجی و اثر دوپلر، جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی طرّه در اثر اعمال میدان مغناطیسی که از مرتبه ۱-۱۰۰ نانومتر است، استفاده می‌شود [۱۵]. با توجه به هزینه بالای این تکنیک‌ها در این پژوهش یک روش ساده و دقیق برای اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش لایه نازک فریت کبالت با استفاده از روش انحراف‌سنجی اپتیکی طرّه ارائه شده است.

روش تجربی

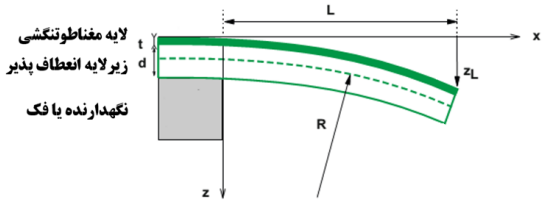
در ابتدا پودر فریت کبالت با خلوص بالا و دانه‌بندی مطلوب به منظور تهیه ماده هدف برای لایه نشانی با استفاده از روش سل- ژل تهیه شد. پس از آن به منظور شناسایی فازهای تشکیل شده از پودر به دست آمده الگوی پراش پرتو ایکس تهیه شد. سپس جهت لایه نشانی پودر فریت کبالت به صورت یک قرص به قطر ۱۵ میلیمتر و ضخامت تقریبی ۲ میلیمتر پرس شد. از روش لایه نشانی لیزر پالسی (PLD) جهت تهیه لایه نازک فریت کبالت استفاده گردید. لایه فریت کبالت با ضخامت ۲۰۰ نانومتر بر روی زیر لایه طرّه‌ای شکل از جنس شیشه به ابعاد ۱۰×۲ میلی‌مترمربع و ضخامت ۱۳۰ میکرومتر انباشت شد. هماهنگ سوم لیزر Nd-YAG با طول موج ۳۵۵ نانومتر و نرخ تکرار ۱۰ هرتز جهت لایه‌نشانی به کار گرفته شد. شدت لیزر ۲ ژول بر سانتی‌متر مربع، فاصله زیر لایه از ماده هدف ۳ سانتی‌متر و زمان لایه‌نشانی ٦ دقیقه بود. برای اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگشی نمونه درحالی که از یک لبه به کمک یک نگهدارنده یا اصطلاحاً «فک» نگه داشته شده است تحت میدان مغناطیسی (در راستای طولی) قرار می‌گیرد (شکل۱). با اعمال میدان خارجی اگر نمونه مغناطوتنگش منفی داشته باشد طول نمونه کوتاه می‌شود، آنگاه در هنگام مقاومت زیرلایه در مقابل این کوتاه شدگی، انحراف لبه

[۱] Terfenol D

طرّه به سمت بالا رخ می‌دهد. حال اگر نمونه مغناطوتنگش مثبت داشته باشد این انحراف به سمت پایین خواهد بود. با اندازه‌گیری میزان این انحراف و با استفاده از رابطه لچیسری و پوزان[۲] :

$$\lambda_f = -\frac{2}{9}\frac{z_L}{L^2}\frac{t^2}{d}\frac{E_s}{E_f}\frac{(1+\nu_f)}{(1+\nu_s)} \qquad (۱)$$

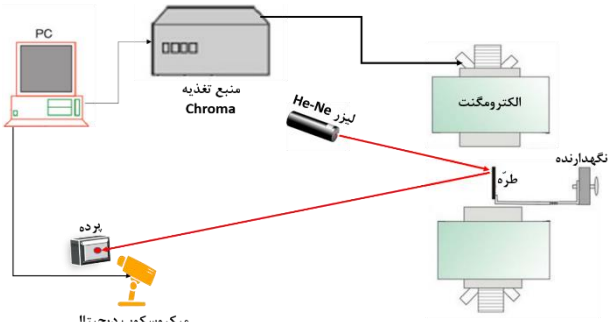
می‌توان ضریب ضریب مغناطوتنگش را برحسب میدان مغناطیسی اعمالی به دست آورد. در این رابطه E و ν به ترتیب مدول یانگ و نسبت پواسون، t و d ضخامت زیرلایه و لایه نازک ، L طول طرّه و Z_L میزان انحراف آن است.



شکل (۱): طرّه مغناطوتنگشی دو لایه‌ای با شعاع انحناء R، طول L، ضخامت t و میزان انحراف Z_L در راستای محور Z، همراه با زیرلایه انعطاف پذیر با ضخامت d.

همانطور که از رابطه (۱) مشخص است برای به دست آوردن ضریب مغناطوتنگش λ تنها کافی است مقدار انحراف طرّه اندازه‌گیری شود. چیدمان اندازه‌گیری میزان این انحراف در شکل (۲) نشان داده شده است. چنانکه در شکل آمده، نمونه طرّه‌ای شکل توسط یک نگهدارنده غیر مغناطیسی درون گاف یک الکترومگنت قرار داده شد. جهت اندازه‌گیری میزان انحراف طرّه با اعمال میدان مغناطیسی از بازتاب باریکه یک لیزر هلیوم–نئون استفاده شد. نور لیزر پس از برخورد به لبه آزاد طرّه بازتاب شده و بازتاب آن بر روی یک پرده ثبت می‌شود. جهت اندازه‌گیری میزان انحراف طرّه، مقدار جابه‌جایی لکه بازتاب بر روی پرده، به کمک یک میکروسکوپ دیجیتال هزار برابر با قدرت تفکیک ۱۲۰۰×۱۶۰۰ مگاپیکسل ثبت گردید. برای افزایش دقت اندازه‌گیری جابجایی لکه بازتاب بر روی پرده ، پرده در فاصله سه متری از نمونه قرار می‌گیرد. با استفاده از نرم‌افزار[۳] و یک منبع‌تغذیه برنامه‌پذیر میدان مغناطیسی از ۵ KOe- تا ۵ KOe+ جاروب شد. در هرگام از میدان مغناطیسی، تصویر لکه روی پرده توسط نرم‌افزار ثبت گردید. سپس با پردازش تصویر جابه‌جایی مرکز لکه روی پرده، با دقت ۱۵ میکرومتر برای هر گام میدان، به دست آمد. در ادامه با توجه به مقادیر به دست‌آمده از جابه‌جایی لکه روی پرده در میدان‌های مغناطیسی مختلف میزان انحراف طرّه و در نتیجه ضریب مغناطوتنگش در میدان‌های مختلف به دست آمد. اندازه‌گیری با اعمال میدان در دو راستای گوناگون طول و عرض طرّه صورت گرفت.

همچنین حلقه پسماند مغناطیسی نمونه توسط چیدمان مغناطواپتیکی کر طولی (MOKE) با استفاده از لیزر نیم‌رسانا به طول موج ۶۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد [۱۶].



شکل(۲): طرحواره‌ای از چیدمان اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش

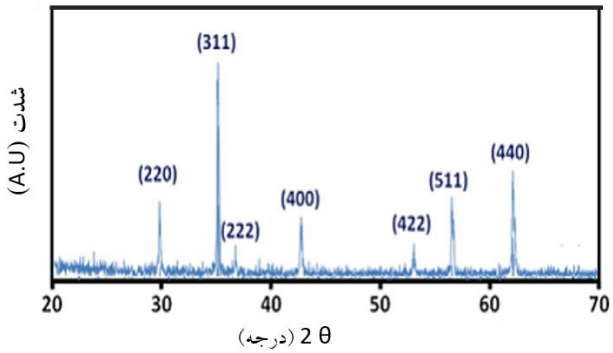
نتایج

الگوی پراش پرتوی X بیانگر ساختار بس‌بلور فریت کبالت برای نمونه پودری است (شکل۳). تمام قله‌های پراش مربوط به ساختار اسپینلی فریت کبالت می‌باشد و ناخالصی در نمونه مشاهده نمی‌شود. حلقه پسماند مغناطواپتیکی نمونه در شکل(٤) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود میزان چرخش مغناطواپتیکی نمونه در میدان ۵ KOe حدود ۰/۰۱۷ درجه است. رفتار حلقه پسماند نشان می‌دهد که لایه نازک فریت کبالت یک نمونه مغناطیسی نرم بوده و با توجه به ناچیز بودن میدان وادارندگی و رفتار نسبتا خطی آن، برای ساخت حسگرهای مغناطوکشسان بسیار مطلوب است.

نمودار ضریب مغناطوتنگش مربوط به لایه نازک فریت کبالت برحسب میدان مغناطیسی اعمالی در دو حالت عمود (راستای عرض طرّه) و موازی (راستای طول طرّه) در شکل (۵) نشان داده

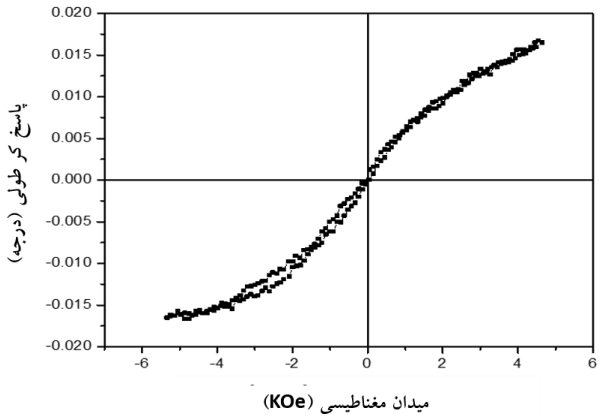
[2] Theory of Lacheisserie and Peuzin

[3] LabView



شکل(۳): نمودار XRD فریت کبالت.

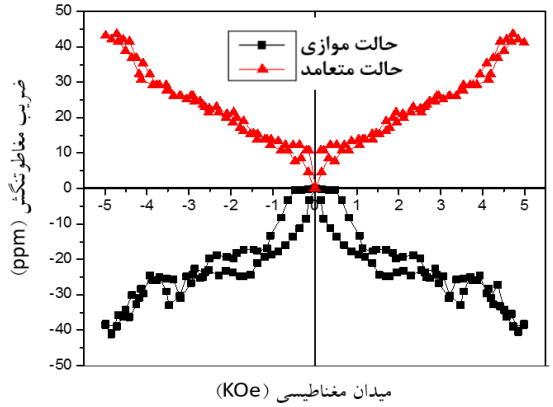
شده است. تفاوت چشم‌گیری بین حالت موازی و عمود دیده نمی‌شود. ضریب مغناطوتنگش مقداری در حدود ٤٢ppm برای میدان ٥KOe دارد. از آنجا که دسترسی به میدان‌های مغناطیسی بالاتر وجود نداشت امکان اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگش در حالت اشباع نمونه فراهم نشد. نتایج به دست آمده با این روش، با رفتار به دست آمده توسط دیگران هم‌خوانی خوبی دارد [۱۷].



شکل(٤): پاسخ کر طولی لایه نازک فریت کبالت.

نتیجه گیری

باتوجه به کاربرد لایه‌نازک مواد مغناطوتنگشی در حسگرها، مبدل‌ها، حافظه‌های مغناطیسی و تصویربرداری‌های فراصوتی، مشخصه‌یابی آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این پژوهش ابتدا پودر و لایه نازک فریت کبالت به ترتیب به روش سل–ژل و روش لایه نشانی لیزر پالسی (PLD) تهیه شد. سپس یک روش ساده و دقیق برای اندازه‌گیری ضریب مغناطوتنگشی لایه نازک با انحراف-سنجی اپتیکی طرّه ارائه شد. نتایج مقداری در حدود ٤٢ppm برای میدان اعمالی ٥ KOe در لایه نازک فریت کبالت به دست داد که هم‌خوانی خوبی با گزارش‌های دیگران دارد و نشان‌دهنده کارآمدی روش اندازه‌گیری ارائه شده است.



شکل(٥): نمودار ضریب مغناطوتنگش لایه نازک فریت کبالت.

مرجع‌ها

[۱] D. Niarchos; "*Magnetic MEMS: Key issues and some applications*"; Sensors Actuators, A Phys. **109**, No. 1–2, (2003) 166–173.

[۲] S. Vashist, *"A review of microcantilevers for sensing applications,"* J. Nanotechnol. 3, No.1, June, (2007) 1–15.

[۳] J.-Ph. Jayand, F. Petit, J. Ben Youssef, and M. V. Indenbom, and J. Miltat; "*Magnetostrictive hysteresis of TbCo / CoFe multilayers and magnetic domains"*; J. Appl. Phys. **9** (2006).

[۴] M.Pasquale, "*Mechanical sensors and actuators*"; Proceedings of the 4th European Magnetic Sensors and Actuators Conf.. **106**, (2003).

[۵] M. J. Dapino; "*On Magnetostrictive Materials and Their Use in Smart Material Transducer*"; Struct. Eng. Mech. J.**1**, (2002) 1–28.

[۶] P. McCorkle; "*Magnetostriction and Magnetelectric Effects in Iron, Nickel and Cobalt*"; Struct. Eng. Mech. J **22**, No 3, (1923).

[۷] E. Klokholm and J. Aboaf; *"The saturation magnetostriction of thin polycrystalline films of iron and cobalt"; J.* Appl. Phys. **53**, (1982).

[۸] E M. J. Dapino, A. B. Flatau, and F. T. Calkins; "*Statistical analysis of Terfenol-D material properties*"; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* July **17**, No. 7 (2006) 587-599.

[۹] H. Mishra, J. Arout Chelvane, and A. Arockiarajan*; "Studies of the magnetostriction in thin films: Experimental, analytical and numerical analysis"*; Sensors Actuators, A Phys., **235**, (2015) 218–226.

[۱۰] C.C. Slonczewski; "*Origin of magnetoelastic effects in cobalt-iron ferrite*"; *J. Phys. Chem. Solids* **15**, No. 3–4, (1960) 335–353.

[۱۱] C. Jiles, N. Bowler, and R. J. Weber; "*Magnetic and magnetoelastic properties of M-substituted cobalt ferrites*"; PhD, *Iowa Univ, (*2007).

[۱۲] J. X. Zhang, J. Y. Dai and H. L. W. Chan; "*The effect of magnetic nanoparticles on the morphology, ferroelectric, and magnetoelectric behaviors of CFO nanocomposites*"; J. Applied Physics **105** (2005).

[۱۳] R. Varghese, R. Viswan, K. Joshi, S. Sei, Y. Zhou, J. Schwartz, and S. Priya; "*Magnetostriction measurement in thin fi lms using laser Doppler vibrometry*"; Journal of Magnetism and Magnetic Materials **363**, (2014) 179–187.

[۱۴] N. B. Ekreem, a. G. Olabi, T. Prescott, a. Rafferty, and M. S. J. Hashmi; "*An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties*"; J. Mater. Process. Technol. **191**, (2007).

[۱۵] S. Vashist; "*A review of microcantilevers for sensing applications*"; J. Nanotechnol. **3**, No. 3, (2007) 1–15.

[۱۶] S M Hamidi, M M Tehranchi and S Sadeghi "*Effect of magnetic annealing on magneto-optical properties of Ce : YIG thin films incorporating gold nanoparticles"*; J. Phys. D: Appl. Phys**. 44**, (2011).

[۱۷] S. Liang, B. G. Ravi, S. Sampath, and R. J. Gambino; "*Atmospheric Plasma Sprayed Cobalt Ferrite Coatings for Magnetostrictive Sensor Applications*"; IEEE transactions on magnetics **43**, No. 6, (2007).