

اثر غلظت کبالت بر رفتار مغناطیسی لایه‌های نازک آلیاژ آهن-کبالت تولید شده به روش کند و پاش موربی

خلیل الله قیصری^{۱*} و چونگ کیم آنگ^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۷، ش ص: ۹۱-۱۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱)

چکیده

در این پژوهش، اثر غلظت کبالت بر ساختار و رفتار مغناطیسی لایه نازک آلیاژ آهن-کبالت با ترکیب $\text{Co}_x\text{Fe}_{1-x}$ ($x=0-0.3$) مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، لایه‌نشانی در زاویه نهشت ۴۲ درجه به کمک روش کند و پاش انجام شد. ساختار بلوری لایه‌های نشانده شده به کمک روش پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) ارزیابی گردید. ویژگی‌های استاتیک و دینامیک مغناطیسی نیز به ترتیب از روی حلقه مغناطش و طیف نفوذپذیری مغناطیسی تعیین گردید. نتایج ارزیابی‌های فازی نشان داد که الگوهای پراش مشابهی در همه لایه‌ها شکل گرفته است که معرف ساختار کریستالی BCC با جهت‌گیری ترجیحی (۱۱۰) است. با این وجود، پارامتر شبکه با افزایش غلظت کبالت روند کاهشی را دنبال کرده است. حلقه‌های M-H دو رفتار متفاوت در جهت آسان‌گرد و سخت‌گرد را نشان داد. بر مبنای آن، میدان ناهمسانگردی مغناطیسی از حدود ۶۰ Oe در لایه آهنی به ۳۳۰ Oe در لایه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ افزایش یافت که به افزایش بسامد تشدید فرومغناطیسی از ۲/۴۴ GHz در لایه آهنی به ۷/۶۶ GHz در آلیاژ $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ منجر شد. بسامد تشدید فرومغناطیسی لایه آلیاژی $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ کاهش اندکی را از مقدار ۷/۶۶ GHz در دمای محیط به ۶/۹۸ GHz در دمای ۴۲۰ K نشان داد که بیان‌گر پایداری حرارتی مطلوب آن است.

واژه‌های کلیدی: کند و پاش موربی، لایه نازک آهن-کبالت، ناهمسانگردی مغناطیسی، بسامد تشدید فرومغناطیس، پایداری حرارتی.

^۱ - دانشیار، گروه مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ - استاد فیزیک، مرکز مغناطیس و ابررسانایی دانشکده فیزیک دانشگاه ملی سنگاپور

*-نویسنده مسئول مقاله: khgheisari@scu.ac.ir

پیشگفتار

روش لایه‌نشانی کند و پاش^۱، یکی از متداول‌ترین روش‌های لایه‌نشانی (انباشت) فیزیکی (از) فاز بخار^۲ محسوب می‌گردد که به صورت گسترده در تولید لایه‌های نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این روش، از یک گاز خنثی (معمولاً آرگون) استفاده می‌شود که با تزریق آن در یک میدان الکتریکی توأم با تخلیه الکتریکی، گاز خنثی یونیزه شده و به سمت ماده منبع که نقش کاتد را دارد شتاب می‌گیرد. برخورد این یون‌های پر انرژی به منبع، به جدا شدن اتم‌های سطحی ماده هدف انجامیده که در نهایت به سمت زیرلایه هدایت شده و بر روی آن پاشیده می‌شوند. به این شکل، یک لایه نازک بر روی زیر لایه تشکیل می‌گردد [۲]. از جمله امتیازهای این روش در مقایسه با سایر روش‌های انباشت فیزیکی فاز بخار می‌توان به امکان ایجاد سطوح وسیع با درجه بلورینگی بالا، سرعت رشد بالای لایه نازک و دمای نسبتاً پایین زیرلایه در حین فرآیند اشاره نمود [۳]. همچنین، در این فرآیند، علاوه بر تولید لایه‌های فلزی مغناطیسی، با انتخاب ماده منبع مناسب می‌توان لایه‌های مغناطیسی سرامیکی (نظیر فریت‌ها) را نیز به سهولت تولید نمود [۴].

یکی از حالات ممکن لایه‌نشانی در روش کند و پاش، لایه نشانی موربی^۳ (نهشت موربی) است که در آن زیرلایه به موازات منبع نیست بلکه نسبت به آن یک زاویه متغیر می‌سازد. در این شرایط، مورفولوژی لایه و ویژگی‌های آن به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۵].

نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در دهه گذشته نشان می‌دهد که روش کند و پاش موربی به بهبود قابل توجه رفتار الکترومغناطیس لایه‌های نازک مغناطیسی انجامیده است [۶-۹]. اهمیت این لایه‌های نازک به قابلیت کاربری آنها در صنعت الکترونیک و فناوری اطلاعات بر می‌گردد که از جمله آنها می‌توان به استفاده آنها در ادوات ارتباط بی‌سیم، ریزالقاگرها، ذخیره‌سازی اطلاعات و جاذب پارازیت‌های الکترومغناطیس اشاره نمود [۱۰-۸].

بهبود رفتار الکترومغناطیسی لایه‌های نشانده شده در روش نهشت موربی، به ریزساختار ستونی زاویه‌دار شده

آنها نسبت به بردار عمود بر سطح لایه نسبت داده شده است که در اثر آن، میدان ناهمسانگردی بزرگی در صفحه فیلم ظاهر می‌یابد و به دنبال آن، بسامد کاری لایه نازک به مقادیر بالاتری سوق می‌یابد [۱۱]. در کنار لایه نشانی موربی، روش‌های دیگری نیز به منظور بهبود رفتار مغناطیسی لایه‌های نازک اتخاذ شده است که از جمله آنها می‌توان به بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی [۸، ۱۰] و [۱۲]، استفاده از زیرلایه آنتی‌فررومغناطیس نظیر MnIr [۱۳ و ۱۴] و عملیات حرارتی پس از لایه‌نشانی [۱۵] اشاره کرد.

در رویکرد بهینه‌سازی ترکیب، معمولاً با بررسی اثر جایگزینی یک عنصر [۸] یا مطالعه تغییر غلظت یک عنصر [۱۰ و ۱۲]، نحوه تغییر رفتار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فو و همکاران، اثر افزایش غلظت نیکل را در خواص مغناطیسی لایه نازک آلیاژ آهن-کبالت-نیکل مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که عنصر نیکل، تا غلظت‌های میانی می‌تواند به افزایش بسامد تشدید فررومغناطیس^۴ (fFMR) به عنوان مهمترین شاخصه مغناطیسی لایه‌های نازک مغناطیسی بینجامد [۱۲]. نتیجه کم و بیش مشابهی در تاثیر مثبت نیکل بر لایه‌های نازک آهن-نیکل توسط همین پژوهشگران مشاهده شده است [۱۰].

آلیاژهای آهن-کبالت به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی، مغناطش اشباع و مقاومت الکتریکی بالا در کنار میدان پسماندزاد کم، از جایگاه ویژه‌ای در بین مواد مغناطیسی نرم برخوردار هستند. ویژگی‌های مطلوب یاد شده، زمینه استفاده لایه‌های نازک این آلیاژها را در صنعت الکترونیک نظیر هسته القاگرها در هدهای حکاکی اطلاعات در دیسک‌های سخت، حفاظ‌های امواج الکترومغناطیس و حسگرهای میدان مغناطیسی فراهم آورده است [۱۵] و [۱۶].

تاکنون ترکیب‌های شیمیایی متفاوتی از لایه‌های نازک آلیاژ آهن-کبالت تهیه شده است که از جمله آنها می‌توان به ترکیب‌های Fe₇₀Co₃₀ [۹، ۱۳ و ۱۵]، Fe₅₀Co₅₀ [-] [۱۶]، Fe₄₀Co₆₀ [۱۷]، و Fe₁₀Co₉₀ [۱۸] اشاره کرد. با این وجود، پژوهش مستقل و واحدی بر روی اثر کبالت به

۱ -Sputtering deposition method

۲ -Physical vapor deposition

۳ -Oblique deposition

۴ -Ferromagnetic-resonance frequency

سخت‌گرد (H_{ch}) و میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_k) از روی حلقه هیستریزاس استخراچ شد. به منظور ارزیابی رفتار دینامیک مغناطیسی (مولفه‌های نفوذپذیری نسبی حقیقی (μ') و نسبی موهومی (μ'')) از تحلیل‌گر شبکه برداری^۲ (Agilent N5230A) در محدوده^۳ ۳۳۰-۴۲۰ K و در بازه دمایی ۰/۱-۱۰ GHz و در بازه دمایی ۳۳۰-۴۲۰ K استفاده شد. این دو مولفه نفوذپذیری نسبی مختلط ($\mu = \mu' - i\mu''$) بر مبنای روش اغتشاش (در) خط انتقال^۸ اندازه‌گیری گردید. در این روش، لایه نازک مغناطیسی در بخشی از خط انتقال موج الکترومغناطیس قرار می‌گیرد که به اغتشاش و تغییر ویژگی‌های خط انتقال می‌انجامد. در اثر این اغتشاش، ویژگی موج عبوری و برخوردی تغییر می‌کند. تحلیل‌گر شبکه برداری، سیگنال عبوری و بازتابی را در حالتی که لایه نازک مغناطیسی در خط انتقال قرار گرفته نسبت به حالتی که در مسیر خط انتقال قرار نگرفته است مقایسه می‌کند. از روی این نسبت‌های قیاسی، مقادیر نسبی نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی به صورت اعداد بدون بعد اندازه‌گیری و گزارش می‌گردد [۲۱].

نتایج و بحث

شکل ۱، الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های تولید شده در غلظت‌های مختلف کبالت را نشان داده است. از آنجا که الگوهای پراش لایه‌های نازک ساخته شده به این روش به دلیل جهت‌گیری ترجیحی (بافت) بلوری به صورت تک خط پراش ظاهر می‌گردد، تنها محدوده^۴ زوایای در برگزیده تک خط پراش آن معیار ارزیابی‌های فازی قرار می‌گیرد [۷].

صورت یک متغیر اصلی بر خواص مغناطیسی آلیاژهای آهن-کبالت مشاهده نشده است. در این پژوهش، اثر غلظت کبالت بر رفتار مغناطیسی لایه‌های نازک Co_xFe_{1-x} ($x=0-0.3$) تولید شده به روش کند و پاش یونی موری مورد ارزیابی قرار گرفته است. رفتار الکترومغناطیسی در غلظت‌های مختلف کبالت به صورت تابعی از بسامد و دما سنجیده شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، لایه‌های نازکی از آلیاژ آهن-کبالت با ضخامت تقریبی 100 nm ، با ترکیب Co_xFe_{1-x} ($x=0-0.3$) به روش کندوپاش یونی تهیه گردید. تنظیمات دستگاهی و متغیرهای تولید در جدول ۱ آمده است. به منظور آنالیز فازی از دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس $Cu_{K\alpha}$ (Philips Analytical) با تابش پرتو مشخصه $X'pert$ استفاده شد. شناسایی فازی به کمک نرم افزار آنالیز فازی انجام شد. از روی موقعیت زاویه^۵ تک خط مشاهده شده در الگوهای پراش پرتو ایکس (مربوط به صفحه^۶ (110) ساختار کریستالی BCC)، پارامتر شبکه به کمک رابطه^۷ زیر اندازه‌گیری شد [۱۹]:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (1)$$

در این رابطه، λ طول موج پرتو ایکس (1.5418 \AA)، θ زاویه پراش و (hkl) اندیس میلر است. همچنین، اندازه^۸ بلورک (D_{XRD}) لایه‌های نازک تولیدی به کمک رابطه^۹ شرر^۱ محاسبه گردید [۲۰]:

$$D_{XRD} = \frac{k \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

k ثابتی برابر با 0.89 و β پهنای خط پراش در نیمه ارتفاع بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان است.

حلقه هیستریزاس لایه‌های نازک تولید شده در دو راستای جهت آسان‌گرد و سخت‌گرد به کمک ردیاب منحنی M-H

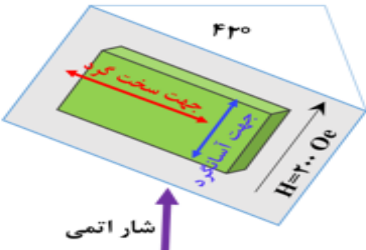
(Hayama Inc., HHC-15CB-100-3D) به دست آمد. شاخصه‌های استاتیک مغناطیسی شامل میدان پسماندزدا در جهت آسانگرد (H_{ce})، میدان پسماندزدا در جهت

۲-Transmission-line perturbation method

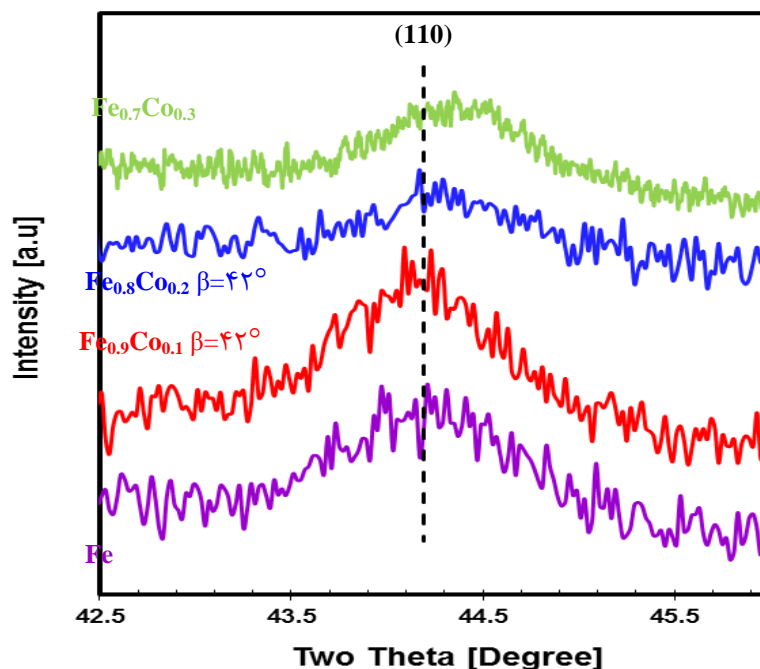
۱- Scherrer

جدول ۱- مشخصات دستگاهی مورد استفاده جهت تولید لایه های نازک آلیاژی آهن-کبالت در پژوهش حاضر

مگنترونی بسامد رادیویی	نوع دستگاه
$\approx 10^{-7}$ Torr	فشار اولیه راکتو
$\approx 10^{-2}$ Torr	فشار گاز آرگون
۸۰ W	توان دستگاه
Co_xFe_{1-x} (x= 0-0.3)	منبع (هدف کند و پاش)
Si (100)	زیر لایه
$0.5 \times 0.5 \times 10 \text{ mm}^3$	ابعاد زیرلایه
42°	زوایة نهشت
۲۴ min	زمان نهشت
۲۰۰ Oe	میدان نهشت



طرحواره نهشت



شکل ۱- الگوهای پراش لایه‌های نازک تولید شده در این پژوهش

خوبی با سایر لایه‌های نازک تهیه شده با روش کند و پاش توسط دیگر محققین برخوردار است [۷ و ۲۴].

حلقه هیستریزیس لایه‌های تولید شده در شکل ۳ آمده است. شاخصه‌های مغناطیسی استخراج شده از این شکل در جدول ۲ گزارش شده است. در همه لایه‌ها، حلقه مغناطش جهت سخت‌گرد، با نمایش کجیدگی بیشتر نسبت به محور M ، رفتار متفاوتی را نسبت به حلقه مغناطش جهت آسان‌گرد نشان می‌دهد که گواه بر ایجاد ناهمسانگردی مغناطیسی در شرایط لایه‌نشانی موربی است. این ناهمسانگردی که در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۷، ۱۱ و ۲۵]، به ریزساختار ستونی کجیده شده این لایه در طی فرآیند رشد نسبت داده می‌شود [۲۳]. با توجه به داده‌های جدول ۲، میدان پسماندزدا روند صعودی را با افزایش غلظت کبالت نشان داده است که نتیجه پهن‌شدگی هر دو حلقه مغناطش جهت سخت‌گرد و آسان‌گرد است. این پهن‌شدگی از نظر کمی، به افزایش میدان ناهمسانگردی مغناطیسی نیز می‌انجامد. میدان ناهمسانگردی مغناطیسی به عنوان مهم‌ترین شاخصه استاتیک مغناطیسی این لایه‌های نازک از حد اشباع میدان اعمالی H در راستای سخت‌گرد به دست می‌آید [۷]. گرچه حلقه مغناطش سخت‌گرد، رفتار اشباع خوبی را در غلظت‌های کم کبالت نشان نداده است، اما روند صعودی آن با افزایش غلظت کبالت کاملاً مشهود است. افزایش این شاخصه استاتیک مغناطیسی، چنانچه در ادامه خواهیم دید، اثر مثبتی را در بهبود رفتار دینامیک مغناطیسی خواهد گذاشت.

شکل ۴ طیف‌های نفوذپذیری مغناطیسی نسبی شامل دو مولفه حقیقی (μ') و موهومی (μ'') را به عنوان شاخصه‌های دینامیک مغناطیسی نشان می‌دهد. هر دو مولفه ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. در بسامدی که مولفه نفوذپذیری موهومی به قله خود می‌رسد، مولفه نفوذپذیری حقیقی از بسامد قله خود گذشته و به نصف مقدار اولیه خود کاهش یافته است. بسامدی که مولفه موهومی نفوذپذیری به قله می‌رسد، بسامد شدید فرومغناطیس (f_{FMR}) نامیده می‌شود. از آنجا که در بسامدهای بالاتر از بسامد تشدید، نفوذپذیری مغناطیسی به یک کاهش می‌یابد، کارایی لایه نازک مغناطیسی از بین می‌رود [۲۶].

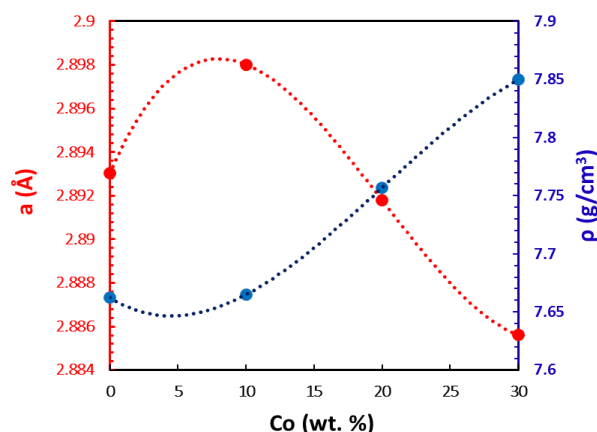
خط پراش ظاهر شده در تمامی الگوهای پراش متعلق به بازتاب از صفحه (۱۱۰) است که بیان‌گر ایجاد ناهمسانگردی بلوری در طی فرآیند رشد لایه نازک است [۱۷]. بر اساس پژوهش‌های پیشین، در شرایط لایه‌نشانی موربی، دانه‌های ستونی کجیده‌ای نسبت به جهت عمود بر صفحه لایه نازک ایجاد می‌گردد که به اثر خودسایگی^۱ در لایه نشانی موربی معروف است [۲۲]. با افزایش زاویه نهشت، درجه کجیدگی آن بیشتر می‌گردد [۲۳]. این ریزساختار ستونی کجیده، علاوه بر ناهمسانگردی شکل (ظاهری)، به دلیل جهت‌گیری ترجیحی بلوری دانه‌های ستونی در حین رشد، واجد ناهمسانگردی بلوری نیز می‌گردد [۲۲].

با توجه به شکل ۱، افزایش غلظت کبالت، کم و بیش به انتقال زاویه پراش قله (۱۱۰) به زوایای بیشتر انجامیده است. افزایش زاویه پراش به معنای کاهش فاصله بین صفحات کریستالی (۱۱۰) است. و با توجه به رابطه مستقیم پارامتر شبکه با فاصله بین صفحات کریستالی، به معنای کاهش پارامتر شبکه یا انقباض نسبی شبکه کریستالی است.

نحوه تغییر پارامتر شبکه با افزایش غلظت کبالت در شکل ۲ نشان داده شده است. انقباض شبکه با افزایش غلظت کبالت به کمتر بودن شعاع اتمی کبالت ($1/\text{Å}52$) نسبت به آهن ($1/\text{Å}56$) بر می‌گردد. از طرفی به دلیل عدد جرمی بزرگتر کبالت ($58/933 \text{ g/mol}$) نسبت به عنصر آهن ($55/845 \text{ g/mol}$)، افزایش غلظت کبالت به افزایش جرم متوسط سلول واحد در کنار کاهش حجم آن می‌انجامد که برآیند همسوی این دو، افزایش چگالی است (شکل ۲).

در همگی نمونه‌ها، خط پراش (۱۱۰) از پهن‌شدگی قابل توجهی برخوردار است. با توجه به رابطه شرر و با کمک نرم افزار آنالیز فازی X'pert، اندازه بلورک در حدود ۱۰ نانومتر تخمین زده می‌شود (جدول ۲) که روند مشخصی را با افزایش غلظت کبالت دنبال نمی‌کند. مقادیر متوسط اندازه بلورک تخمین زده شده از انطباق

۱- Self-shadow effect



شکل ۲- تغییر پارامتر شبکه و چگالی سلول واحد با غلظت کبالت در لایه‌های نازک تولیدی

جدول ۲- شاخص‌های ساختاری و مغناطیسی لایه‌ها شامل فاصله بین صفحات کریستالی (d_{110})، پارامتر شبکه (a)، چگالی (ρ)، اندازه بلورک (D)، میدان پسماندزای آسان‌گرد (H_{ce}) و سخت‌گرد (H_{ch})، میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_k) و فرکانس تشدید فرومغناطیس (f_{FMR})

Co	$d_{110}(\text{\AA})$	$a(\text{\AA})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$D(\text{nm})$	$H_{ce}(\text{Oe})$	$H_{ch}(\text{Oe})$	$H_k(\text{Oe})$	$f_{FMR}(\text{GHz})$
۰	۲/۰۴۵۷	۲/۸۹۳۰	۷/۶۶۲	۱۰/۰	۱۷/۵۶	۸/۱۶	≈۶۰	۲/۴۴
۱۰	۲/۰۴۹۲	۲/۹۱۰۵	۷/۶۶۵	۱۱/۳	۲۹/۸۶	۱۲/۶۲	≈۶۵	۵/۷۱
۲۰	۲/۰۴۴۸	۲/۸۹۱۸	۷/۷۵۷	۱۱/۷	۱۴۱/۶۲	۱۴۲/۰۲	≈۲۶۰	۵/۸۰
۳۰	۲/۰۴۰۴	۲/۸۸۵۶	۷/۸۵۰	۱۰/۲	۱۶۲/۹۸	۱۳۴/۶۸	≈۳۳۳	۷/۶۶

طرفی با توجه به شکل ۳، میدان ناهمسانگردی نیز با افزایش غلظت کبالت از ۶۰ Oe در حالت لایه آهن خالص به ۳۳۳ Oe در آلیاژ $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ افزایش یافته است. بنابراین بهبود قابل توجه رفتار دینامیک مغناطیسی در آلیاژ $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ در نتیجه رشد قابل توجه میدان ناهمسانگرد مغناطیسی ایجاد شده است.

به منظور ارزیابی پایداری حرارتی بهترین لایه تولید شده با بالاترین بسامد تشدید، طیف‌نگاری مغناطیسی به صورت تابعی از دما نیز صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۵ آمده است. با توجه به شکل، لایه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ پایداری حرارتی مناسبی در بازه دمایی ۳۰۰-۴۲۰ K نشان داده است. نحوه تغییرات بسامد تشدید (f_{FMR}) و مقدار بیشینه مولفه موهومی نفوذپذیری (μ''_{max}) در شکل ۶ نشان داده شده است. درحالی‌که بسامد تشدید کاهش اندکی را با افزایش دما تجربه کرده است، μ''_{max} روند افزایشی را با دما دنبال کرده است.

بنابراین بهبود بسامد تشدید، به بهبود بازه بسامدی که لایه مغناطیسی کارآمد است می‌انجامد. بر اساس رابطه کیتل^۱، بسامد تشدید متناسب است با مجذور حاصلضرب میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_K) در مغناطش اشباع $[15](M_s)$:

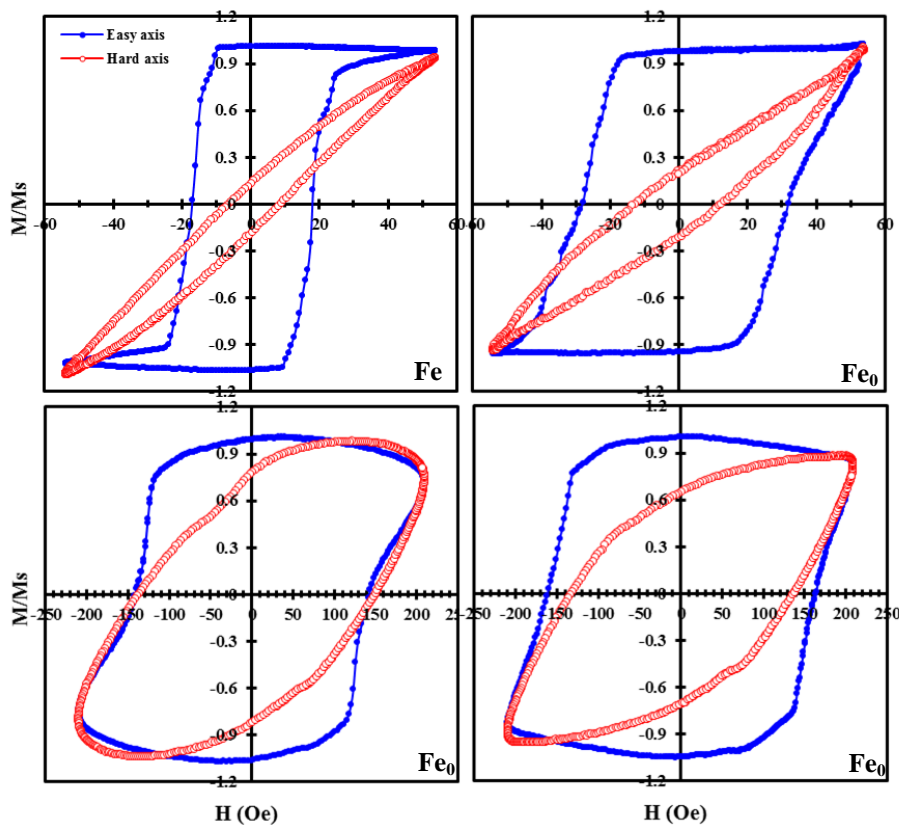
$$f_{FMR} = (\gamma / 2\pi) \sqrt{4\pi M_s H_K} \quad (3)$$

که γ نسبت ژیرومغناطیس است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کبالت، بسامد تشدید افزایش یافته است. با توجه به جدول ۲،

بسامد تشدید از ۲/۴۴ GHz در حالت لایه آهن خالص به ۷/۶۶ GHz در آلیاژ $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ افزایش یافته است. از

۱- Kittel's equation



شکل ۳- حلقه‌های هیستریزس در جهات آسان‌گرد و سخت‌گرد لایه‌های نازک آلیاژهای آهن-کبالت

نهشت موربی رشد یافته‌اند. بازه دمایی اعمالی به قدر کافی بالا نیست تا مورفولوژی یاد شده را با تغییر مواجه سازد. ناهمسانگردی کریستالی-مغناطیسی نیز به جهت-گیری بلوری ترجیحی دانه‌های ستونی بر می‌گردد که در بازه دمایی یاد شده نمی‌تواند با تغییر چندانی مواجه شود [۷]. اما به دلیل نفوذ جزئی اتمی، ناهمسانگردی ناشی از نظم‌یافتگی جفت‌های اتمی می‌تواند با تغییر مواجه شود- [۲۷]. این ناهمسانگردی که در سیستم‌های چند عنصری مشاهده می‌شود، در اثر جهت‌گیری جفت‌های اتمی در راستای میدان اعمالی ایجاد می‌شود. نفوذ جزئی این جفت‌های اتمی در اثر افزایش دما به کاهش این ناهمسانگردی می‌انجامد [۲۷] و بنابراین طبق رابطه کیتل، به کاهش بسامد تشدید منجر می‌شود.

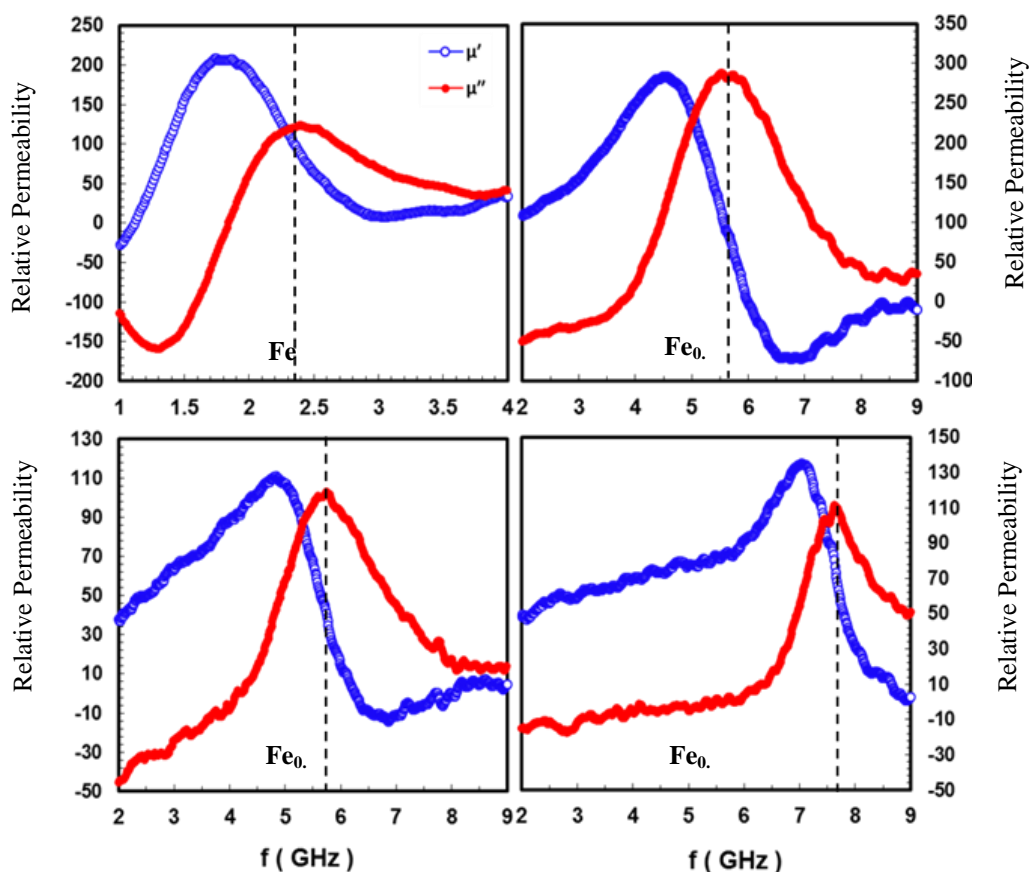
کاهش بسامد تشدید با افزایش دما را می‌توان بر مبنای رابطه کیتل (رابطه ۳) تحلیل نمود. با افزایش دما، به دلیل تقویت اثر بی‌نظم‌سازی حرارتی بر جهت‌گیری گشاورهای مغناطیسی، شدت مغناطش در راستای میدان خارجی اعمالی کاهش می‌یابد. بنابراین مغناطش اشباع با کاهش مواجه می‌شود. با توجه به رابطه کیتل، کاهش مغناطش اشباع، به کاهش بسامد تشدید می‌انجامد.

اما با افزایش دما، میدان ناهمسانگردی مغناطیسی نیز دچار تغییر می‌گردد. میدان ناهمسانگردی کل از مولفه-های مختلفی نظیر کریستالی-مغناطیسی^۱، شکل^۲ و نظم-یافتگی جفت‌های اتمی^۳ تشکیل شده است. ناهمسانگردی شکل به دانه‌های کشیده کجیده‌ای باز می‌گردد که در طی

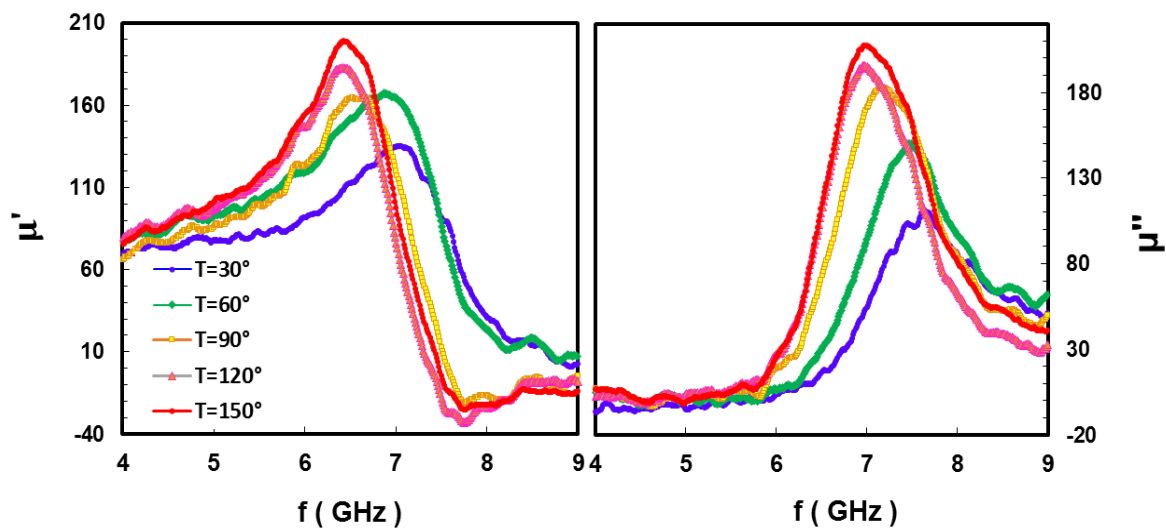
۱- Shape anisotropy

۲- Pair-ordering anisotropy

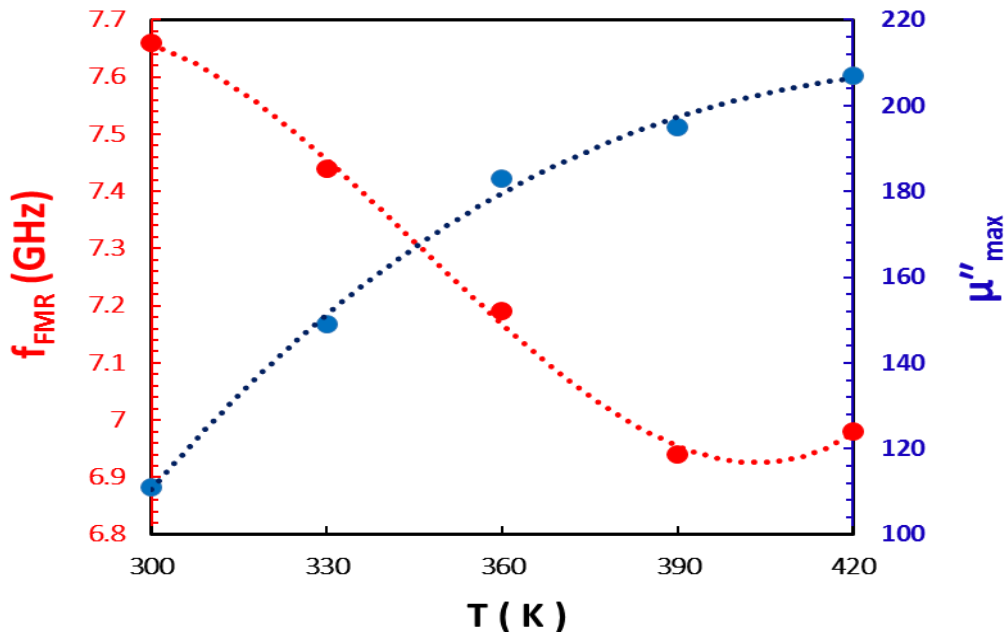
۳- Magnetocrystalline anisotropy



شکل ۴- طیف نفوذپذیری نسبی حقیقی و موهومی برای لایه‌های نازک آلیاژهای آهن-کبالت



شکل ۵- طیف نگاری مغناطیسی لایه آلیاژی Fe_{0.7}Co_{0.3} به صورت تابعی از دما



شکل ۶- تغییرات بسامد تشدید و مقدار بیشینه مولفه موهومی نفوذپذیری نسبی لایه آلیاژی Fe_{0.7}Co_{0.3} با دما

نتیجه گیری

۳- طیف نگاری مغناطیسی افزایش قابل توجهی را در بسامد تشدید فرومغناطیسی از ۲/۴۴ GHz در لایه آهنی به ۷/۶۶ GHz در آلیاژ Fe_{0.7}Co_{0.3} نشان داد.
۴- لایه آلیاژی Fe_{0.7}Co_{0.3} پایداری حرارتی خوبی را در محدوده دمایی ۳۰۰-۴۲۰ K به نمایش گذاشت؛ به نحوی- که کاهش اندکی در بسامد تشدید از ۷/۶۶ GHz در دمای محیط تا ۶/۹۸ GHz در دمای ۴۲۰ K مشاهده شد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه ملی سنگاپور و دانشگاه شهید چمران اهواز (از طریق پژوهانه: SCU.EM98.222) که امکان همکاری مشترک در راستای اجرای شدن این پژوهش را فراهم ساختند تقدیر می‌گردد.

در این پژوهش، ساختار، رفتار استاتیک و دینامیک مغناطیسی لایه‌های نازک آلیاژ آهن-کبالت با ترکیب Co_xFe_{1-x} (x= 0-0.3) مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش عبارت است از:
۱- در تمامی لایه‌های نازک، بافت بلوری (۱۱۰) با ساختار کریستالی BCC مشاهده شد. افزایش غلظت کبالت به کاهش پارامتر شبکه و افزایش چگالی لایه‌ها منجر گشت.
۲- حلقه مغناطش، پهن‌شدگی قابل توجهی را در همه لایه‌های تولید شده نشان داد. پهن‌شدگی حلقه‌ها، کم و بیش روند صعودی را با افزایش غلظت کبالت دنبال کرد که نشانگر افزایش میدان پسماندزدا در جهات آسان‌گرد و سخت‌گرد مغناطیسی است. پهن‌شدگی حلقه مغناطش به افزایش میدان ناهمسانگردی مغناطیسی به عنوان مهم-ترین شاخصه استاتیک مغناطیسی از حدود ۶۰ Oe در لایه آهنی به ۳۳۰ Oe در لایه Fe_{0.7}Co_{0.3} انجامید.

References:

- 1- R. Gailliot-Vuillecot, A.L. Thomann, T. Lecas, C. Cachoncinlle, F. Millon, and A. Caillard, "Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films", *Vacuum*, vol. 181, pp. 109734(1-14), 2020.
- 2- M. Qadir, Y. Li, and C. Wen, "Ion-substituted calcium phosphate coatings by physical vapor deposition magnetron sputtering for biomedical applications: A review", *Acta Biomaterialia*, vol. 89, pp.14-32, 2019.
- 3- X. Qin, L. Di, C. Sui, R. Zhao, J. Fan, F. Wang, and X. Xu, "Effects of the Mn/Bi ratio on the magnetic properties of MnBi thin films grown by magnetron co-sputtering", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 842, pp.155694 (1-8), 2020.
- 4- V. Pretti Rossi, R. Pereira Bonini, A. Marino Gonçalves, A. José Gualdi, J. Antônio Eiras, and F. Luis Zabotto, "Silicon substrate orientation influence on structural and magnetic properties of BaFe₁₂O₁₉ thin films obtained by RF magnetron sputtering", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 504, pp. 166705(1-6), 2020.
- 5- D. Fu and X. Cheng, "Exploring the effect on the columnar structure and porosity of the synthesized Be films by oblique angle deposition in magnetron sputtering", *Physica B: Condensed Matter*, vol. 590, p.412221(1-7), 2020.
- 6- E.N. Sheftel and E.V. Harin, "Two modes of magnetic structure of nanocrystalline FeZrN films prepared by oblique-angle magnetron sputtering", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 479, pp.84-87, 2019.
- 7- Kh. Gheisari, and C. K. Ong. "Magnetic properties and thermal stability of nanocrystalline Fe films prepared by oblique sputtering deposition method", *Physica B: Condensed Matter*, vol. 595, pp. 412365 (1-7), 2020.
- 8- H. Chang, Y. Huang, C. Hsieh, C. Shih, W. Chang, and D. Xue, "Magnetic properties and high frequency characteristic of obliquely sputtered Co-M (M= V and Nb) thin films", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 539, pp. 276-279, 2012.
- 9- X. Zhong, N.N. Phuoc, Y. Liu, and C. Ong, "Employment of Co underlayer and oblique deposition to obtain high resonance frequency and excellent thermal stability in FeCo thin films", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 365, pp. 8-13, 2014.
- 10- L. Phua, N. Phuoc, and C. Ong, "Investigation of the microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited Ni_xFe_{1-x} (x= 0.2-0.76) films", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 520, pp. 132-139, 2012.
- 11- X. Zhong, N.N. Phuoc, W.T. Soh, C. Ong, L. Peng, and L. Li, "Tailoring the magnetic properties and thermal stability of FeSiAl-Al₂O₃ thin films fabricated by hybrid oblique gradient-composition sputtering", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 429, pp. 52-59, 2017.
- 12- L. Phua, N. Phuoc, and C. Ong, "Effect of Ni concentration on microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited NiCoFe films", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 543, pp. 1-6, 2012.
- 13- N.N. Phuoc, and C. Ong, "Influence of ferromagnetic thickness on dynamic anisotropy in exchange-biased MnIr/FeCo multilayered thin films", *Physica B:*

Condensed Matter, vol. 406(18), pp. 3514-3518, 2011.

14- K. Gheisari and C.K. Ong, "Enhancing High-Frequency Properties of Nanocrystalline Sputtered Fe Thin Films by Using MnIr Underlayer and Oblique Deposition", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, In press, 2020.

15- L. Phua, N. Phuoc, and C. Ong, "Influence of field-annealing on the microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited $\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}$ films", Journal of Alloys and Compounds, vol. 553, pp. 146-15, 2013.

16- X. Liu, H. Kanda, and A. Morisako, "The effect of underlayers on FeCo thin films", Journal of Physics: Conference Series, vol. 266, p. 012037 (1-5), 2011.

17- S. Kaushalya, V. Husain, N.K. Barwal, Gupta, S. Hait, and S. Chaudhary, "Tunable magnetic anisotropy in obliquely sputtered $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ thin films on Si (100), Physica B: Condensed Matter, vol. 570, pp 1-5, 2019.

18- Y. Fukuma, Z. Lu, H. Fujiwara, G. Mankey, W. Butler, and S. Matsunuma, "Strong uniaxial magnetic anisotropy in CoFe films on obliquely sputtered Ru underlayer", Journal of Applied Physics, vol. 106, pp. 076101-3, 2009.

19-B.D. Cullity, C.D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, second ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2009.

۲۰- ا. صفری، خ. قیصری، و م. فرید، "بررسی ساختار و رفتار مغناطیسی پودر فریت نیکل تولید شده به روش تخلیه قوس پلاسما"، مجله مواد نوین، جلد ۷، شماره ۴، ص ۱۷-۲۶، تابستان ۱۳۹۶.

21- Y. Liu, L. Chen, C.Y. Tan, H.J. Liu, and C.K. Ong, "Broadband complex

permeability characterization of magnetic thin films using shorted microstrip transmission-line perturbation. Review of scientific instruments", vol. 76(6), pp.063911(1-8), 2005.

22- F. Tang, D. L. Liu, D. X. Ye, Y. P. Zhao, T. M. Lu, G. C. Wang, and A. Vijayaraghavan, "Magnetic properties of Co nanocolumns fabricated by oblique-angle deposition", Journal of Applied Physics, vol. 93(7), pp. 4194-4200, 2003.

23- N.N. Phuoc, G. Chai, and C. Ong, "Enhancing exchange bias and tailoring microwave properties of FeCo/MnIr multilayers by oblique deposition", Journal of Applied Physics, vol. 112(11), pp. 113908, 2012.

24- G. Chai, N.N. Phuoc, and C. Ong, "Optimizing high-frequency properties of stripe domain ferrite doped CoFe thin films by means of a Ta buffer layer", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 46(41), pp. 415001, 2013.

25- X. Zhong, N.N. Phuoc, W.T. Soh, C. Ong, and L. Li, "Dynamic magnetization of NiZn ferrite doped FeSiAl thin films fabricated by oblique sputtering", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 432, pp. 373-381, 2017.

26- N.N. Phuoc, and C. Ong, "FeCoHfN thin films fabricated by co-sputtering with high resonance frequency", Journal of Alloys and Compounds, vol. 509(9), pp. 4010-4013, 2011.

27- X. Zhong, N.N. Phuoc, G. Chai, Y. Liu, and C. Ong, "Thermal stability and dynamic magnetic properties of FeSiAl films fabricated by oblique deposition", Journal of Alloys and Compounds, vol. 610, pp. 126-131, 2014.

