

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

خلیل الله قیصری^{*}، چونگ کیم آنگ^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱، ش ص: ۴۴-۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵)

چکیده

در این پژوهش، اثر لایه نشانی مورب بر ویژگی‌های لایه نازک آلیاژ آهن-کبالت با ترکیب شیمیایی $Fe_{90}Co_{10}$ تولید شده به روش کند و پاش مورد ارزیابی قرار گرفت. لایه نشانی در دو زاویه نشست صفر و ۴۲ درجه صورت گرفت. ساختار بلوری لایه-های 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 تعیین گردید. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که گرچه در هر دو شرایط لایه نشانی، الگوهای پراش مشابه با جهت‌گیری ترجیحی (۱۱۰) در فاز نانو ساختار BCC آلیاژ آهن-کبالت شکل گرفته، اما پارامتر شبکه آنها به صورت قابل توجهی متفاوت است. لایه نشانده شده در زاویه نشست ۴۲°، پارامتر شبکه کوچکتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، حلقه‌های M-H کاملاً متفاوتی در جهات آسانگرد و سخت‌گرد این لایه مشاهده می‌شود که نشان دهنده حضور میدان ناهمسانگردی مغناطیسی بزرگی در این لایه است (بزرگتر از ۶۰ Oe). در نتیجه آن، بسامد تشدید فرومغناطیسی به بزرگی ۵/۷۱ GHz در لایه نشسته شده در شرایط لایه نشانی مورب به دست آمده که به صورت قابل توجهی بزرگتر از مقدار مشاهده شده در لایه نشسته شده در شرایط لایه نشانی عمودی است (۰/۸۴۳ GHz). همچنین، پایداری حرارتی خوبی در لایه‌های نشسته شده، در محدوده دمایی ۳۳۰ تا ۴۲۰ K مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روش کند و پاش، لایه نشینی در شرایط مورب، ناهمسانگردی مغناطیسی، لایه نازک آهن-کبالت، بسامد تشدید فرومغناطیس

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

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

* نویسنده مسوول: khgheisari@scu.ac.ir

$$f_{FMR} = (\gamma / 2\pi) \sqrt{4\pi M_s H_K} \quad (1)$$

پیشگفتار

که γ نسبت ژیرومغناطیس است. به ازای یک لایه مغناطیسی مشخص، مطابق با رابطه کیتل، با افزایش میدان ناهمسانگردی، می‌توان بسامد تشدید را افزایش داد. روش‌های متفاوتی به این منظور مورد توجه محققین قرار گرفته است که از جمله آن می‌توان به بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی [۸]، استفاده از زیرلایه آنتی-فررومغناطیس [۱۱]، اعمال میدان مغناطیسی در حین لایه‌نشانی [۱۲]، لایه‌نشانی به صورت مورب (نَهشت موربی) [۱۳] و یا ترکیبی از آنها اشاره نمود.

در این میان، نهشت موربی در روش لایه‌نشانی کند و پاش، به دلیل سادگی و اثرگذاری قابل توجه در میدان ناهمسانگردی مغناطیسی و بسامد تشدید، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. در نهشت عمودی، منبع یا هدف به موازات زیرلایه قرار می‌گیرد؛ به نحویکه شار اتمی لایه نشانی از منبع به سمت زیر لایه به صورت عمودی جریان می‌یابد. اما در نهشت موربی، سطح زیرلایه نسبت به سطح منبع زاویه می‌سازد (زاویه نهشت)، بنابراین نهشت لایه به صورت موربی بر روی زیر لایه صورت می‌پذیرد [۱۴ و ۱۵].

در لایه‌نشانی موربی، معمولاً یک میدان مغناطیسی به موازات سطح زیر لایه اعمال می‌گردد که در نتیجه آن، ناهمسانگردی مغناطیسی به صورت دو جهت مغناطیسی آسان‌گرد (در راستای میدان اعمالی) و سخت‌گرد (عمود بر راستای میدان اعمالی) در صفحه لایه نشانده شده ایجاد می‌شود. در نتیجه ناهمسانگردی ایجاد شده، دو حلقه هیستریزیس مغناطیسی M-H متفاوت در جهت آسان‌گرد و سخت‌گرد ایجاد می‌شود. حلقه هیستریزیس جهت آسان‌گرد، به صورت کم و بیش مربعی ظاهر می‌شود، اما حلقه هیستریزیس جهت سخت‌گرد به صورت کجیده (نسبت به محور M) ظاهر می‌شود [۹ و ۱۴]. بزرگی میدان ناهمسانگردی مغناطیسی از روی حلقه مغناطیسی M-H سخت‌گرد سنجیده می‌شود. میدان

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای از سوی پژوهشگران بر تولید و توسعه لایه‌های نازک مغناطیسی با ترکیب‌های شیمیایی متنوع شده است. این توجه ریشه در کاربردهای گوناگون این لایه‌ها در صنعت الکترونیک دارد که از جمله آنها می‌توان به ذخیره‌سازی و انتقال داده‌ها اشاره کرد [۱ و ۲]. روش‌های مختلفی به منظور تولید لایه‌های نازک مغناطیسی تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است. روش لایه‌نشانی کند و پاش^۱ [۳]، رسوب‌دهی الکترونیکی^۲ [۴] و لایه‌نشانی با لیزر پالسی^۳ [۵]، از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت ایجاد لایه‌های نازک مغناطیسی است.

روش لایه‌نشانی کند و پاش، از جمله فراگیرترین روش‌های لایه‌نشانی است که امکان ایجاد لایه‌هایی با درجه بلورینگی بالا و سرعت رشد بالا با حفظ دمای نسبتاً پایین در هنگام لایه نشانی فراهم می‌آورد [۶]. علاوه بر آن، به کمک این روش، می‌توان لایه‌های نازک مغناطیسی سرامیکی (نظیر فریت‌ها) را نیز به سهولت تولید نمود [۷].

از مهم‌ترین ملزومات لایه‌های نازک مغناطیسی مورد استفاده در فناوری اطلاعات، حفظ کارایی آنها در بسامدهای کاری بسیار بالا در محدوده گیگاهرتز، توام با کوچک‌سازی آنها است [۸]. مهم‌ترین شاخصه مغناطیسی که به خوبی توصیف‌گر محدوده بسامدی لایه‌های نازک مغناطیسی است، بسامد تشدید فررومغناطیس (f_{FMR}) است. در بسامدهای بالاتر از بسامد تشدید، نفوذپذیری مغناطیسی به یک کاهش یافته و کارایی لایه نازک مغناطیسی از میان می‌رود [۹]. این موضوع، محققین را بر آن داشته است تا با اتخاذ شیوه‌های مختلف، بسامد تشدید لایه‌های نازک مغناطیسی را افزایش دهند. بر مبنای رابطه کیتل^۴، بسامد تشدید متناسب با مجذور حاصلضرب میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_K) در مغناطش اشباع (M_s) است [۱۰].

^۱ Sputtering deposition method

^۲ Electrodeposition

^۳ Pulsed laser deposition

^۴ Ferromagnetic-resonance frequency

^۵ Kittel's equation

^۶ Oblique deposition

روی آلیاژهای غلیظ آهن-کبالت متمرکز بوده است [۱۰]، ۱۳ و ۱۷]، اما در این پژوهش، یک آلیاژ رقیق از کبالت، با توجه به نکات یاد شده در بالا انتخاب گردیده است.

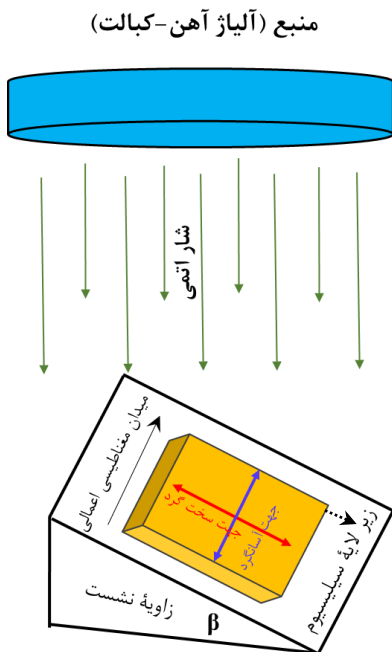
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور لایه‌نشانی از دستگاه کندوپاش مگنترونی جریان متناوب در بسامد رادیویی^۱ (Ionivac, C-K-08)، با توان کاری ۸۰ وات و با قابلیت پوشش‌دهی موربی استفاده شد. فشار اولیه راکتور دستگاه کمتر از 10^{-7} تنظیم و سپس راکتور با آرگون خالص با سرعت جریان $16 \text{ cm}^3/\text{min}$ تا فشار 10^{-3} پر گردید. از ورق‌های سیلیسیومی با بافت کریستالی ترجیحی (۱۰۰) با ابعاد $10 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ به عنوان زیر لایه استفاده شد. به منظور ایجاد لایه نازک آلیاژ آهن-کبالت، از قرصی با ترکیب شیمیایی $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ به عنوان منبع لایه نشانی با قطر ۳ in استفاده شد و با در نظر گرفتن زمان لایه نشانی ۲۴ دقیقه، لایه‌های نازک مغناطیسی با همان ترکیب و ضخامت تقریبی ۱۰۰ نانومتر تهیه گردید. لایه‌نشانی بر زیرلایه سیلیسیومی در دو وضعیت نهشت عمودی ($\beta=0^\circ$) و نهشت موربی با زاویه نهشت 42° درجه ($\beta=42^\circ$) صورت گرفت. در شکل ۱، طرح واره‌ای از نهشت زاویه‌دار یا موربی نشان داده شده است. مطابق شکل، میدان مغناطیسی به بزرگی 200 Oe در راستای جهتی در صفحه لایه که به صورت جهت آسان‌گرد ظاهر می‌گردد، اعمال شده است. به منظور آنالیز فازی از دستگاه پراش-سنگ پرتو ایکس (Philips Analytical) با تابش پرتو مشخصه $\text{Cu}_{K\alpha}$ با طول موج 1.5404 \AA آنگستروم و با اندازه گام 0.02° درجه استفاده شد. شناسایی فازی به کمک نرم افزار آنالیز فازی X'pert صورت گرفت.

اعمالی H که در آن مغناطش M به اشباع می‌رسد به عنوان تخمینی از میدان ناهمسانگرد مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. معمولاً با افزایش زاویه نهشت، کجیدگی حلقه هیستریزس جهت سخت‌گرد بیشتر و در نتیجه، میدان ناهمسانگرد و بسامد تشدید افزایش می‌یابد [۱۴].

آلیاژهای آهن-کبالت (بین ۳۰ تا ۶۰ درصد اتمی کبالت) به دلیل خواص مغناطیسی مطلوب خود، نظیر: نفوذپذیری مغناطیسی بالا، مغناطش اشباع بالا، میدان پسماندزداي کم و مقاومت الکتریکی بالا، از جایگاه ممتازی در بین مواد مغناطیسی نرم برخوردار هستند. این ویژگی‌ها، منجر به استفاده لایه‌های نازکی از این آلیاژها در پاره‌ای از ادوات الکترونیک نظیر هسته القاگرها در هدهای حکاکی اطلاعات در دیسک‌های سخت، حسگرهای میدان مغناطیسی و حفاظ‌های امواج الکترومغناطیس گردیده است [۱۰ و ۱۷]. آلیاژهای آهن-کبالت با غلظت ۳۰ تا ۶۰ درصد اتمی کبالت، علی‌رغم خواص مطلوب یاد شده، خصوصاً مغناطش اشباع بالا، از ناهمسانگری مغناطیسی اندکی برخوردار هستند [۱۸] که طبق رابطه کیتل اثر مطلوبی بر بسامد تشدید آنها به دنبال ندارد. در عوض، آلیاژ $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ به عنوان یک آلیاژ رقیق حاوی کبالت، علاوه بر مغناطش اشباع بالاتر نسبت به آهن خالص، افت چندانی در ثابت ناهمسانگردی نشان نمی‌دهد [۱۸]. بنابراین می‌توان با هزینه کمتر، آلیاژ رقیق $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ که از مغناطش اشباع کمتری نسبت به آلیاژهای غلیظ آهن-کبالت (نظیر: $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$) برخوردار است را انتخاب نمود تا با ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتر خود، جبران کمتر بودن مغناطش اشباع را نماید. بر همین مبنا، در این پژوهش، آلیاژ آهن-کبالت با ترکیب شیمیایی $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ انتخاب و به روش کندوپاش در دو حالت نهشت عمودی و نهشت موربی تهیه و رفتار دینامیک مغناطیسی آن به صورت تابعی از بسامد و دما مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که با توجه به گزارش‌های پیشین، عمده پژوهش‌های صورت گرفته بر

^۱ Radio-frequency (rf) magnetron sputtering



شکل ۱. طرحواره‌ای از لایه نشانی مورب مورد استفاده در پژوهش حاضر.

اعمال گردید. جزئیات بیشتر در مورد اندازه‌گیری نفوذپذیری در مرجع [۲۰] آمده است.

نتایج و بحث

شکل ۲، طیف پراش پرتوی ایکس لایه‌های نازک ایجاد شده در دو حالت نشست عمودی و مورب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که الگوی پراش لایه‌های نازک تولید شده به این روش، به صورت تک خط پراش که معرف بافت کریستالی (۱۱۰) ساختار BCC است ظاهر می‌گردند [۱۱ و ۱۴]. بنابراین ارزیابی فازی تنها بر محدوده باریکی از زاویه پراش به منظور شناسایی موقعیت، پهنا و شدت خط پراش صورت می‌گیرد که به ترتیب معرف پارامتر شبکه، اندازه بلورک و درجه بلورینگی فاز مربوطه است.

اندازه بلورک (D_{XRD}) به کمک رابطه شرر^۱ محاسبه گردید [۱۹]:

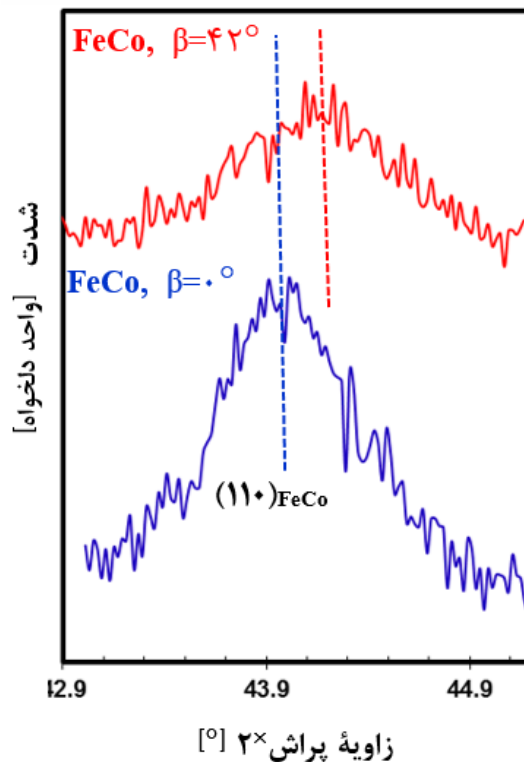
$$D_{XRD} = \frac{k \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

λ طول موج پرتو ایکس تابش شده، k ثابتی برابر با 0.89 ، β پهنای خط پراش در نیمه ارتفاع بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان و θ زاویه پراش است.

حلقه هیستریزس لایه‌های تهیه شده به کمک ردیاب منحنی M-H (Hayama Inc., HHC-15CB-100-3D) به دست آمد. به منظور اندازه‌گیری طیف نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی از تحلیل‌گر شبکه برداری^۲ (Agilent N5230A) در محدوده بسامدی $1-10$ GHz و در بازه دمایی $330-420$ K استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری اثر میدان خارجی در طیف نفوذپذیری، میدان مغناطیسی خارجی متغیر بین 10 تا 90 Oe در حین اندازه‌گیری به موازات جهت آسان‌گرد لایه بر صفحه لایه

^۱ Scherrer

^۲ Vector network analyzer

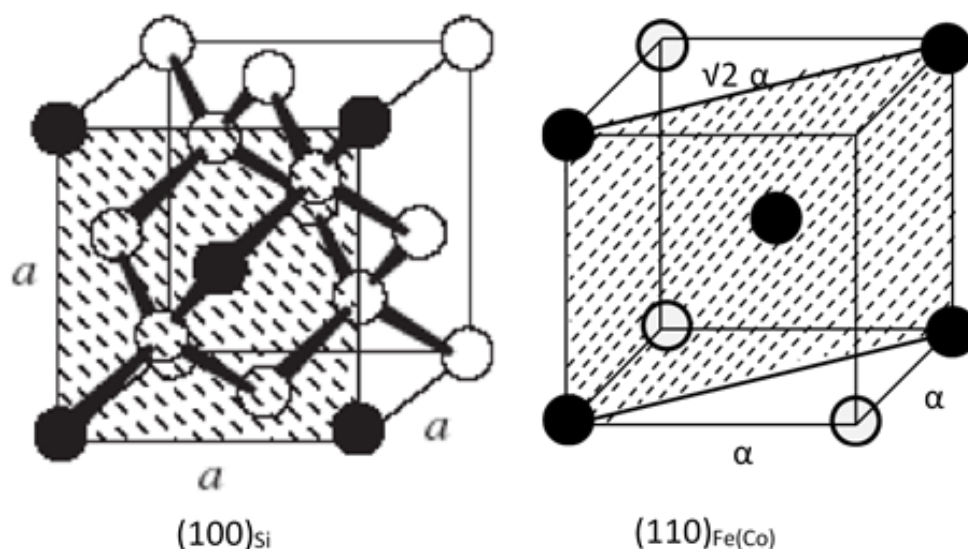


شکل ۲. الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک تولید شده.

با توجه به ظاهر الگوهای پراش، با افزایش زاویه نشست از 0° به 42° ، تک خط پراش (110) به سمت زوایای بزرگتر انتقال یافته است. افزایش زاویه پراش به معنای کاهش در اندازه پارامتر شبکه است (جدول ۱). به عبارت دیگر، ساختار کریستالی در حالت نشست مورب، با یک انقباض شبکه‌ای مواجه گردیده است. این انقباض، به ریزساختار ستونی لایه نازک نسبت داده شده است که با افزایش زاویه نشست، کجیدگی بیشتری نسبت به جهت عمود بر صفحه لایه نازک می‌یابد [۲۱]. این کجیدگی که به اثر خودسایگی^۱ در لایه نشانی مورب نسبت داده می‌شود، به اعوجاج در شبکه کریستالی به صورت کاهش اندازه پارامتر شبکه می‌انجامد [۲۱].

رشد ترجیحی صفحه (110) ساختار بلوری BCC آلیاژ تولیدی بر روی صفحه (100) زیر لایه سیلیسیومی با ساختار بلوری الماسی، احتمالاً به دلیل کاهش انرژی سطح مشترک آن دو در اثر ایجاد سطح مشترک نیمه-همبسته کم انرژی است. با توجه به شکل ۳، چینش اتمی این دو صفحه بسیار مشابه است؛ گرچه به دلیل تفاوت تراکم اتمی و شعاع‌های اتمی در این دو صفحه، سطح مشترک همبسته همراه با کرنش‌های پیوستگی زیاد و یا به صورت یک سطح مشترک نیمه‌همبسته به همراه نابجایی‌های عدم تطابق است. بر این مبنا، رابطه کریستالی دو فاز لایه و زیر لایه به صورت $(100)_{Si} // (110)_{Fe(Co)}$ می‌گردد. ظهور تک خط پراش یا توسعه بافت کریستالی در این لایه، نشان از ایجاد ناهمسانگری کریستالی است که در حین رشد لایه نازک ظاهر شده است [۱۷].

^۱Self-shadow effect



شکل ۳. مقایسه آرایش اتمی در صفحه (۱۱۰) ساختار کریستالی BCC با صفحه (۱۰۰) ساختار کریستالی الماسی.

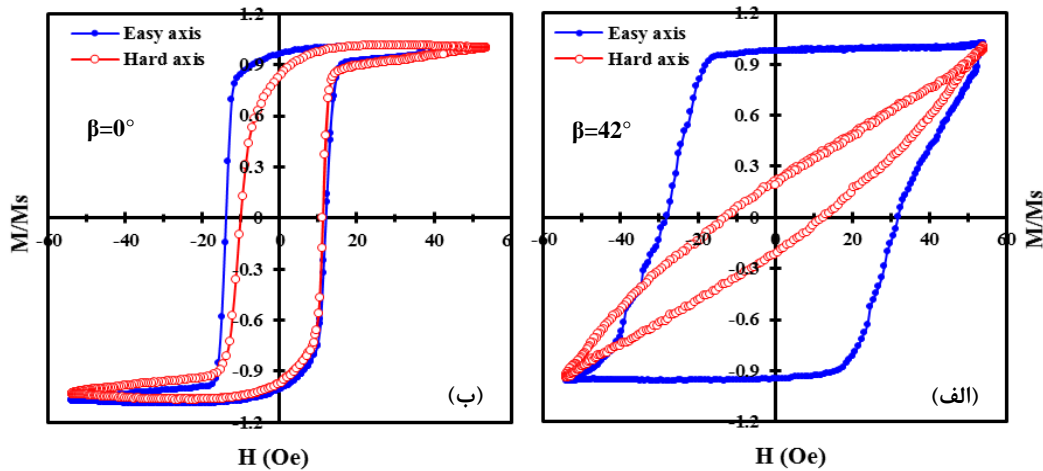
۱- حلقه‌های مغناطش در لایه تولید شده در نهشت عمودی، کم و بیش مشابه و مربعی است و هیچ کجیدگی قابل توجهی در جهت سخت‌گرد در آن مشاهده نمی‌شود. این به آن معنا است که میدان مغناطیسی اعمالی به تنهایی نتوانسته است به ناهمسانگردی مغناطیسی قابل توجهی دست یابد.

۲- حلقه‌های مغناطش سخت‌گرد و آسان‌گرد، تفاوت قابل توجهی را در حالت نهشت مورب نشان می‌دهند. درحالی‌که حلقه مغناطش آسان‌گرد نزدیک به مربعی با میدان پسماندزدای بزرگی است، حلقه کجیده‌ای برای جهت سخت‌گرد مشاهده می‌شود. میدان ناهمسانگردی مغناطیسی در حالت نشست مورب، بیش از ۶۰ Oe است. ۳- پهن شدگی قابل توجهی در حلقه مغناطش آسان‌گرد در لایه نشسته شده در حالت مورب مشاهده می‌شود که به معنای افزایش میدان پسماندزدای مربوطه از ۱۳/۲۰ Oe به ۲۹/۸۶ Oe است.

خطوط پراش هر دو لایه، از پهن شدگی قابل توجهی نیز برخوردار است. با توجه به رابطه شرر و با کمک نرم افزار فازی X'pert، اندازه بلورک در هر دو لایه در محدوده ۱۰ نانومتر تخمین زده می‌شود (جدول ۱). این تخمین از انطباق مناسبی با داده‌های گزارش شده از لایه‌های نازک تولید شده با روش کند و پاش توسط دیگر محققین برخوردار است [۱۴ و ۲۲]. همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که شدت خط پراش لایه نشسته شده در وضعیت آریب، از مقادیر کمتری برخوردار است که ممکن است به کاهش درجه بلورینگی مربوط باشد.

شکل ۴ حلقه هسترزیس لایه‌های تولید شده را نشان می‌دهد. از روی این حلقه‌ها، میدان پسماندزدا در جهت آسان‌گرد (H_{ce})، میدان پسماندزدا در جهت سخت‌گرد- (H_{ch}) و میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_k) به دست آمده که در جدول ۱ گزارش شده است.

با توجه به حلقه هسترزیس و داده‌های به دست آمده از آن، نتایج زیر قابل حصول است:



شکل ۴. حلقه‌های هیستریزیس در جهات سخت گرد و آسان گرد لایه‌های نازک تولید شده در حالت نشست مورب (الف) و عمودی (ب).

جدول ۱. شاخص‌های ساختاری و مغناطیسی لایه‌ها شامل فاصله بین صفحات کریستالی (d_{110})، پارامتر شبکه (a)، اندازه بلورک (D)، میدان پسماندزاد آسان گرد (H_{ce}) و سخت گرد (H_{ch})، میدان ناهمسانگردی مغناطیسی (H_k) و فرکانس تشدید فرومغناطیس (fFMR).

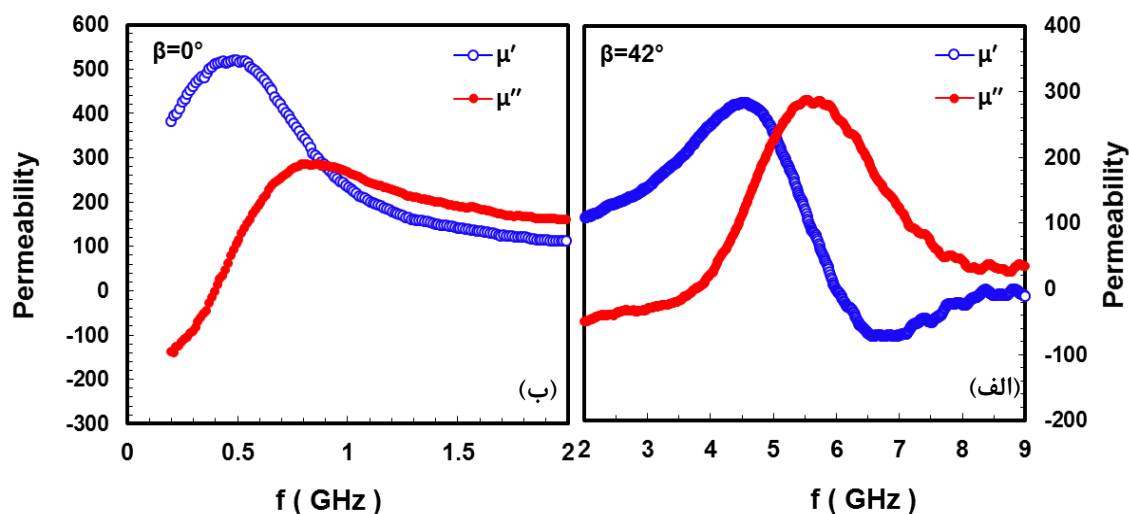
$\beta(^{\circ})$	$d_{110}(\text{\AA})$	$a(\text{\AA})$	D(nm)	$H_{ce}(\text{Oe})$	$H_{ch}(\text{Oe})$	$H_k(\text{Oe})$	$f_{\text{FMR}}(\text{GHz})$
۰	۲/۰۵۸۰	۲/۹۱۰۵	۱۰/۳	۱۳/۲۰	۱۰/۸۵	۳۲/۵	۰/۸۴۳
۴۲	۲/۰۴۹۲	۲/۸۹۸۰	۱۰/۵	۲۹/۸۶	۱۲/۶۲	>۶۰	۵/۷۱

بنابراین در هر دو طیف، یک قله مشاهده می‌شود که از نظر بسامدی منطبق با یکدیگر نیستند. در بسامدی که جزء حقیقی نفوذپذیری پس از عبور از قله، تقریباً به نصف مقدار اولیه خود کاهش یافته، جزء موهومی نفوذپذیری به قله خود رسیده است. مهم‌ترین شاخصه مغناطیسی که از طیف‌های نفوذپذیری استنتاج می‌شود، بسامد تشدید فرومغناطیس است که در آن، جزء موهومی نفوذپذیری مغناطیسی به قله خود رسیده است. این بسامد، محدوده بسامد کاری لایه مغناطیسی را تعیین می‌کند. با توجه به جدول ۱، بسامد تشدید رشد قابل توجهی را از ۵/۷۱ GHz در حالت نشست عمودی به ۰/۸۴۳ GHz در حالت نشست مورب داشته است. با نظر به رابطه کیتل

ناهمسانگردی مشاهده شده در نشست مورب، به ریزساختار ستونی کجیده شده این لایه در اثر شار اتمی مورب نسبت به سطح زیر لایه نسبت داده شده است [۲۳]. به بیان دقیق‌تر، شکل‌گیری ریزساختار ستونی و کجیده شده، به ترتیب منجر به دو نوع ناهمسانگردی شکل به دلیل ایجاد ریزساختار ستونی و ناهمسانگردی کریستالی به دلیل کجیدگی جهت رشد دانه‌های ستونی می‌گردد [۲۳]. مجموعه نکات بالا، مویده ظهور ناهمسانگردی قوی در لایه نازک رشد یافته در حالت نشست مورب است.

شکل ۵ طیف‌های نفوذپذیری مغناطیسی شامل دو جزء حقیقی (μ') و موهومی (μ'') را نشان می‌دهد. در هر دو، ابتدا نفوذپذیری افزایش و سپس کاهش یافته است.

(رابطه ۱)، این افزایش قابل توجه به افزایش ناهمسانگردی مغناطیسی در وضعیت نشست مورب نسبت داده می‌شود.



شکل ۵. طیف نفوذپذیری حقیقی و موهومی برای لایه‌های نازک تهیه شده در حالت نشست مورب (الف) و عمودی (ب).

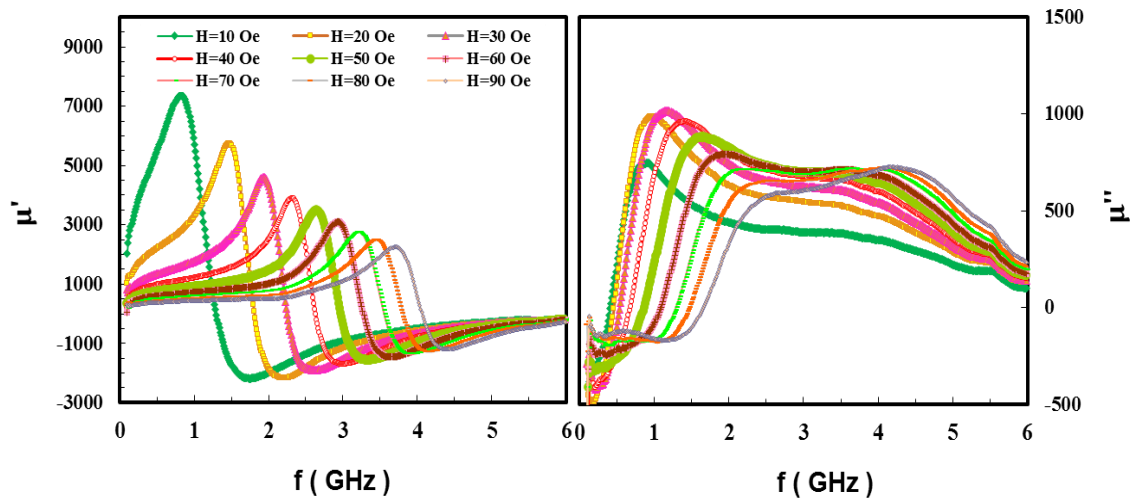
بزرگتر است [۲۴]. بسامد تشدید بزرگتر لایه نشسته شده در وضعیت مورب با این تئوری نیز همخوانی دارد. شکل ۶، اثر اعمال میدان خارجی را بر طیف‌های نفوذپذیری در حین آزمون بر لایه نازک نشسته شده در حالت نهشت عمودی نشان می‌دهد. به طور کلی، افزایش شدت میدان خارجی منجر به انتقال قله تشدید به بسامدهای بیشتر می‌شود [۲۵].

در واقع، ریزساختار ستونی کجیده شده ایجاد شده در شرایط نهشت مورب، به صورت کاهش پارامتر شبکه در الگوی پراش و کجیدگی حلقه مغناطش جهت سخت‌گرد خود را نشان داده است که هر دو از آثار ناهمسانگردی شکل به دلیل ایجاد ریزساختار ستونی و ناهمسانگردی کریستالی به دلیل کجیدگی جهت رشد دانه‌های ستونی است. در نهایت، این ناهمسانگردی ایجاد شده است که بسامد تشدید را به بیش از ۶ برابر افزایش داده است.

طیف نفوذپذیری حقیقی از تطابق خوبی نیز با مدل استونر و ولفارس^۱ برخوردار است. بر مبنای این تئوری، نفوذ پذیری در بسامدهای کم رابطه معکوسی با میدان ناهمسانگردی دارد. هر چه میدان ناهمسانگردی بزرگتر، مقادیر μ' در بسامدهای کم (نفوذپذیری استاتیک) کمتر می‌گردد [۲۲]. در لایه نشسته شده در وضعیت مورب، ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتر و مقدار نفوذپذیری استاتیک کمتر است. از طرف دیگر، بر مبنای رابطه استونر^۲، هر چه μ' استاتیک کمتر باشد، بسامد تشدید

^۱ Stoner and Wolfarth theory

^۲ Snoek's relation



شکل ۶. اثر میدان خارجی بر طیف نفوذپذیری حقیقی و موهومی لایه تهیه شده در حالت نشست عمودی.

با توجه به نتایج، دامنه نوسانات μ_s در لایه نشانی عمودی بیشتر است. حداکثر این دامنه نوسانات برای نشست عمودی نسبت به مقدار متوسط ۲۱ درصد است؛ در صورتی که برای نشست مورب ۱۳ درصد است. این تفاوت می‌تواند به آهنگ تغییرات متفاوت دو شاخصه H_k و M_s با دما در دو حالت لایه نشینی نسبت داده شود.

به طور کلی، با افزایش دما، به دلیل تقویت اثر عامل مخرب بی‌نظم‌سازی حرارتی در برابر جهت‌گیری ترجیحی گشتاورهای مغناطیسی در راستای جهت میدان خارجی، رفتار مغناطیسی به صورت تدریجی از حالت فرومغناطیس به سمت پارامغناطیس حرکت می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش دما، در اثر پخش شدگی جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی، مولفه برآیند جهت‌گیری‌ها در راستای میدان کاهش می‌یابد که به معنای کاهش شدت مغناطش در راستای میدان خارجی اعمالی یا کاهش مغناطش اشباع است. اما با افزایش دما، میدان ناهمسانگردی مغناطیسی نیز دچار تغییر می‌گردد. با افزایش دما، به دلیل پراکندگی نسبی جهت گشتاورهای مغناطیسی نسبت به جهت میدان، انرژی لازم برای رسیدن به اشباع در جهت آسان‌گرد افزایش و برعکس، انرژی لازم برای رسیدن به اشباع در جهت سخت‌گرد کاهش می‌یابد. بنابراین، با

با افزایش میدان، شدت قله‌های تشدید نیز کاهش و پهنای آنها افزایش یافته است. افزایش بسامد قله تشدید با افزایش میدان با رابطه اسنوک نیز همخوانی دارد. اما این افزایش همچنان از بسامد تشدید به دست آمده در حالت نشست مورب کمتر است که حاکی از تاثیر قابل توجه روش رسوب‌دهی مورب در بسامد تشدید است.

به منظور ارزیابی پایداری حرارتی لایه‌های تولید شده، طیف‌نگاری مغناطیسی به صورت تابعی از دما نیز صورت گرفت که در شکل ۷ آمده است. در بررسی پایداری حرارتی لایه‌ها، معمولاً دو شاخصه نفوذپذیری حقیقی استاتیک و بسامد تشدید مورد سنجش قرار می‌گیرد. نفوذپذیری استاتیک (μ_s) بر مبنای رابطه زیر، ارتباط مستقیم با مغناطش اشباع (M_s) و ارتباط معکوس با ناهمسانگردی مغناطیسی (H_k) دارد [۲۶]:

$$\mu_s = 1 + \frac{M_s}{H_k} \quad (3)$$

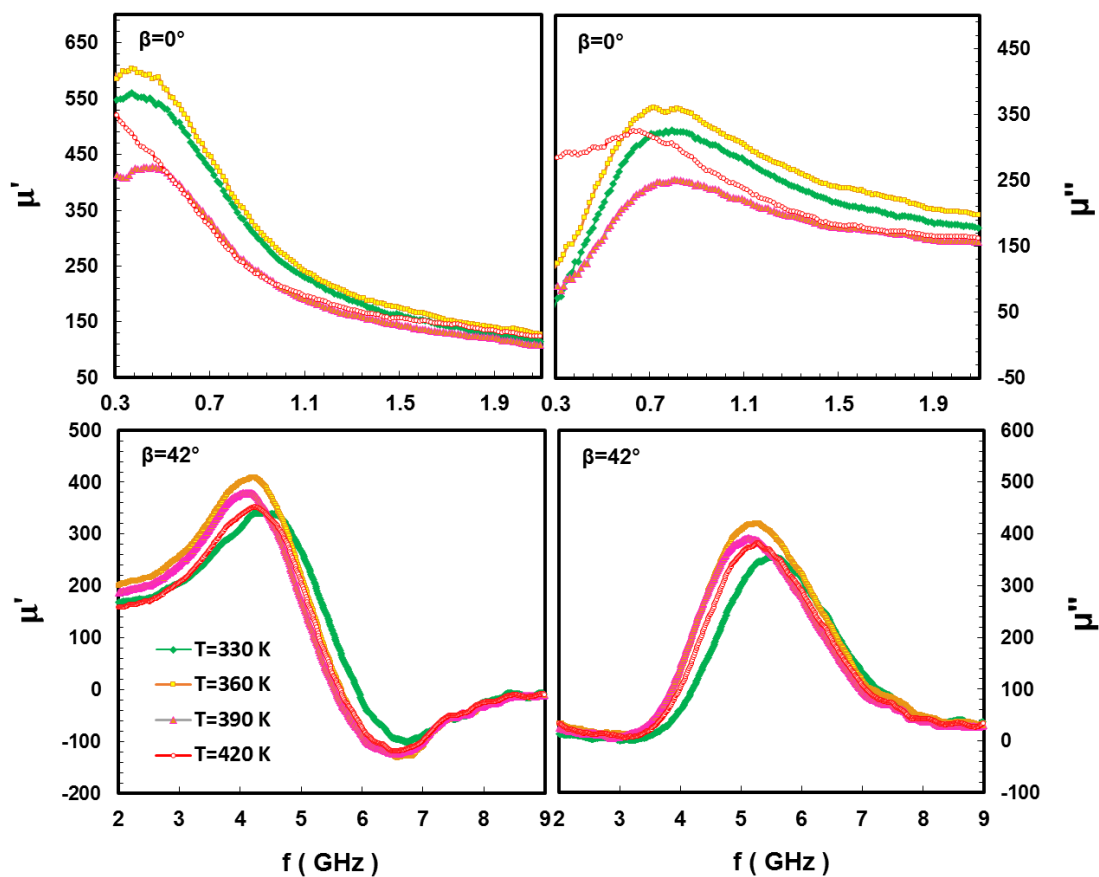
از آنجا که هر دو شاخصه H_k و M_s با افزایش دما، کاهش می‌یابد، تغییرات μ_s با دما معمولاً یک روند نوسانی را بسته به آهنگ تغییرات آن دو، حول یک مقدار میانگین دنبال می‌کند [۲۷]. شکل ۸، این نحوه تغییرات با دما را برای دو حالت لایه‌نشانی مورب و عمودی نشان داده است.

مغناطش اشباع به ترتیب در دمای T و صفر کلوین است. n که به صورت توان در رابطه بالا ظاهر شده، متناسب با نوع پوشش و شرایط آن تغییر می‌کند. در شرایط پوشش-دهی موربی، مولفه‌های دیگر در ناهمسانگردی کل مشارکت می‌کنند که از جمله آن می‌توان به ناهمسانگردی شکل و کریستالی اشاره کرد. ناهمسانگردی شکل به ریزساختار ستونی و ناهمسانگردی کریستالی به کجیدگی جهت رشد دانه‌های ستونی نسبت داده می‌شود [۲۳].

توجه به تعریف ناهمسانگردی، میدان ناهمسانگردی کوچکتر می‌گردد. از این منظر، کاهش میدان ناهمسانگردی را می‌توان به کاهش مغناطش اشباع نسبت داد که روند تغییرات آن را از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۲۷]:

$$K(T)/K(0) = [M_s(T)/M_s(0)]^n \quad (4)$$

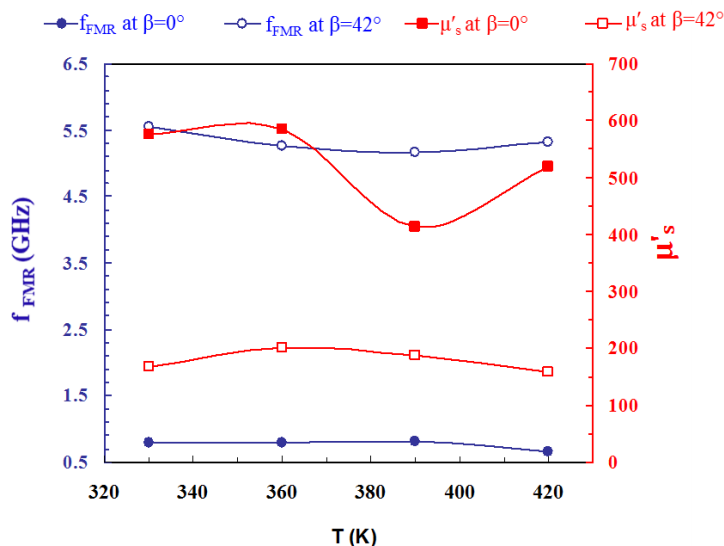
که $K(0)$ و $K(T)$ ثوابت ناهمسانگردی مغناطیسی به ترتیب در دمای T و صفر کلوین است و $M_s(0)$ و $M_s(T)$



شکل ۷. اثر دما بر طیف نفوذپذیری حقیقی و موهومی لایه‌های تهیه شده در حالت نشست عمودی و مورب.

که ناهمسانگردی در نهشت موربی استقلال بیشتری نسبت به کاهش دما (یا کاهش مغناطش اشباع با دما) نشان می‌دهد که به پایداری حرارتی بیشتر خواهد انجامید. این پایداری حرارتی با دنبال نمودن نحوه تغییرات بسامد تشدید با دما در شکل ۸ قابل تشخیص است. با توجه به شکل ۸، بسامد تشدید در هر دو شرایط لایه نشانی، روند کاهشی را دنبال نموده است.

از آنجا که بازه دمایی اعمالی به قدر کافی بالا نیست تا مورفولوژی یاد شده را با تغییر مواجه سازد، این ناهمسانگردی با تغییر دما تغییر نمی‌کند. از طرفی، با توجه به حلقه‌های مغناطش (شکل ۴)، ناهمسانگردی شکل-کریستالی، نقش برجسته‌ای را در ناهمسانگردی کل لایه ایجاد شده در نهشت مورب دارد. در این شرایط، توان رابطه ۳ کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد



شکل ۸. نحوه تغییر نفوذپذیری استاتیک و بسامد تشدید با دما در حالت نهشت عمودی و مورب.

نتیجه گیری

در این پژوهش، لایه‌های نازک مغناطیسی آلیاژ آهن-کبالت با ترکیب شیمیایی $\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10}$ به روش کند و پاش در دو حالت نهشت عمودی و مورب تولید گردید. لایه نشسته شده در شرایط لایه نشانی مورب، دو حلقه هیستریزس کاملاً متفاوت را در دو راستای آسان‌گرد و سخت‌گرد نشان داد که حاکی از ناهمسانگردی مغناطیسی قابل توجه آن است. میدان ناهمسانگرد مغناطیسی با اندازه بیش از 60 Oe به بسامد تشدید فرومغناطیس بزرگی به اندازه $5/71\text{ GHz}$ در آن انجامید. این بسامد افت ناچیزی (۵ درصد) با افزایش دما از 330 K به 420 K داشته است. این به آن معنا است که میدان ناهمسانگردی مغناطیسی که به بهبود بسامد تشدید در لایه نشانی شده در شرایط نهشت مورب گردیده، همچنان پایداری خود را در در محدوده سنجیده شده در این پژوهش (330 K – 420 K) به خوبی حفظ کرده است.

بسامد تشدید در لایه ایجاد شده در نهشت عمودی با کاهش از $0/79\text{ GHz}$ در دمای 330 K به $0/66\text{ GHz}$ در دمای 420 K کاهش ۱۷ درصدی را نشان داده است. اما این بسامد در شرایط نهشت موربی، با کاهش از $5/55\text{ GHz}$ در دمای 330 K به $5/31\text{ GHz}$ در دمای 420 K کاهش ۵ درصدی را نشان می‌دهد که به معنای پایداری حرارتی بهتر لایه نهشت موربی است. بر مبنای رابطه کیتل (رابطه ۱)، بسامد تشدید متناسب با مجذور حاصلضرب میدان ناهمسانگردی مغناطیسی در مغناطش اشباع است $(\sqrt{H_K \cdot M_s})$. بنابراین پایداری بیشتر H_K با دما در لایه ایجاد شده در نهشت موربی، به پایداری بیشتر بسامد تشدید در این لایه انجامیده است.

با توجه به رابطه ۲، می‌توان مقادیر کمتر μ_s در حالت نهشت موربی نسبت به نهشت عمودی را نیز توجیه نمود. مقادیر بالاتر H_K در حالت $\beta=42^\circ$ نسبت به $\beta=0^\circ$ (جدول ۱)، به کاهش μ_s انجامیده است.

References:

- 1-H. Sepehri-Amin, Y. Tamazawa, M. Kambayashi, G. Saito, Y.K. Takahashi, D. Ogawa, T. Ohkubo, S. Hirosawa, M. Doi, T. Shima, and K. Hon, "Achievement of high coercivity in Sm (Fe_{0.8}Co_{0.2})₁₂ anisotropic magnetic thin film by boron doping", *Acta Materialia*, vol. 194, pp. 337-342, 2020.
- 2- K. Hono, and H. Sepehri-Amin, "Prospect for HRE-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets", *Scripta Materialia*, vol. 151, pp. 6-13, 2018.
- 3- R. Graillet-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.
- 4- N. Thangaraj, and T. Christy, "Effect of current density on electrodeposited cobalt ferrous tungsten phosphorus magnetic thin films", *Materials Today: Proceedings*, In press, 2020.
- 5- T. Nguyen Vana, I.de Moraes, N. M. Dempsey, C. Champeaux, and F. Dumas-Bouchiat, "Textured Nd-Fe-B hard magnetic thin films prepared by pulsed laser deposition with single alloy targets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 520, pp. 167584, 2020.
- 6- 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.
- 7- 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.
- 8- 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.
- 9- 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.
- 10- L. Phua, N. Phuoc, and C. Ong, "Influence of field-annealing on the microstructure, magnetic and microwave properties of electrodeposited Co_{0.3}Fe_{0.7} films", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 553, pp. 146-15, 2013.
- 11- 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.
- 12- 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.
- 13- M. Arif, Z. Zhang, J. Tang, M. Amir, E. Liu, and F. Xu, "Efficient excitation of exchange dominated spin waves in oblique deposited CoFeB thin films", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 499, pp. 166072, 2020.
- 14- 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

15- 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.

16- M. Zöfl, S. Kreuzer, D. Weiss, and G. Bayreuther, "Epitaxial nanomagnets with intrinsic uniaxial in-plane magnetic anisotropy", *Journal of Applied Physics*, vol. 87(9), pp. 7016-7018, 2000.

17- S. Husain, V. Barwal, N.K. 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- R.C. O'handley, "Modern magnetic materials: principles and applications", Wiley, New York, pp. 374-376, 2000.

۱۹- 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.

20- Y. Liu, L. Chen, C. Tan, H. Liu, and C. Ong, "Broadband complex permeability characterization of magnetic thin films using shorted microstrip transmission-line perturbation", *Review of Scientific Instruments*, vol. 76(6), pp, 063911, 2005.

21- 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.

22- Z. Liu, and C. Ong, "Microstructure and thickness dependent magnetic properties of nanogranular Co-Zn-O thin films for microwave applications", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509(41), pp. 10075-10079, 2011

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- N. Borhan, and K. Gheisari, "Structural and magnetic properties of nanocrystalline lithium-zinc ferrite synthesized by microwave-induced glycine-nitrate process", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 27(6), pp. 1483-1490, 2014.

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, 373-381, 2017

26- X. Zhong, N.N. Phuoc, W.T. Soh, C. Ong, L. Peng, and L. Li, "Tailoring the magnetic properties and thermal stability of FeSiAl- Al_2O_3 thin films fabricated by hybrid oblique gradient-composition sputtering", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 429, pp. 52-59, 2017.

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

