



## بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی لایه نازک Fe[Fe/Cr]n تولید شده به روش کندوپاش DC/RF

ابراهیم پایمزد\* و علی قاسمی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

### چکیده

### واژگان کلیدی:

ساختار چندتایی از لایه نازک فرومغناطیسی و غیر مغناطیسی به دلیل دارا بودن اثر مغناطومقاومت بسیار بزرگ در میدان‌های مغناطیسی کوچک، بسیار اهمیت دارند. لایه‌های متناوب فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس در این تحقیق لایه نازک چندتایی آهن / کروم به صورت Fe[Fe/Cr]n با n=15,30,45 به روش کندوپاش DC/RF تهیه شدند. همچنین Fe[Fe/Cr]n با دمای زیر لایه ۴۵۰°C لایه‌نشانی شدند. الگوهای پراش پرتو ایکس، لایه نازک با ساختار بلوری آهن با صفحه (۱۱۰) و (۲۰۰) را تایید کردند. سطح نانوساختار لایه‌ها در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، مشخص شدند. تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی دوبعدی و سه بعدی، ضمن نمایش مورفولوژی سطح، زبری آن را نشان داد. با استفاده از منحنی‌های پسماند مغناطیسی ارتباط بین ضخامت، تعداد لایه و زبری ساختار چند لایه Fe/Cr و لایه نازک آهن بررسی شد. بیشترین نیروی پسماندزای مغناطیسی Oe ۱۰۱ متعلق به لایه نازک Fe[Fe/Cr]45-450 است، که برای Fe[Fe/Cr]45 لایه‌نشانی شده در دمای محیط، ۳۸ Oe می‌باشد. رفتار دیواره نیل حوزه ۱۸۰° در لایه Fe[Fe/Cr]45-450 با میکروسکوپ نیروی مغناطیسی مشخص شد.

لایه نازک

کندوپاش

مغناطومقاومت بزرگ

ویژگی‌های مغناطیسی

لایه چندتایی آهن / کروم

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۹

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2057469.1644

## Investigation of structural and magnetic properties of Fe[Fe/Cr]n thin films produced by the DC/RF sputtering method

### Abstract

Multilayers of ferromagnetic and non-magnetic thin films are vital because of a very large magnetoresistance effect in small magnetic fields. In this study, multilayer thin films of iron/chromium in the form of Fe[Fe/Cr]n with n = 15, 30, and 45 were prepared by DC/RF sputtering. Additionally, Fe[Fe/Cr]n was deposited at a substrate temperature of 450 °C. X-ray diffraction patterns confirmed the thin film with a crystalline structure of iron with (110) and (200) planes. The nanostructured surface of the layers is evident in scanning electron microscopy images. Two-dimensional and three-dimensional atomic force microscopy images showed the surface morphology and roughness. Using magnetic remanence curves, the relationship between the thickness, number of layers, and roughness of the Fe/Cr multilayer structure and the thin iron layer was investigated. The highest magnetic coercivity is 101 Oe for the thin film Fe[Fe/Cr]45-450, which is 38 Oe for Fe[Fe/Cr]45 deposited at ambient temperature. Magnetic force microscopy reveals the 180° domain with the behavior of the Nile wall for Fe[Fe/Cr]45-450.

**Keywords:** Thin film, Sputtering, Giant Magnetoresistance, Magnetic properties, multilayer of iron/chromium

\* Corresponding author E-mail: paimozd@gmail.com

## ۱- مقدمه

مرکزدار می‌باشد و گشتاور مغناطیسی اتم‌های کروم در گوشه‌های شبکه بلوری دارای جهت پادموازی با اتم میانی هستند، رفتار پادفرومغناطیس را ایجاد می‌کند. با قرار گرفتن کروم در بین دو لایه آهن، هنگامی که تعداد لایه‌های کروم فرد است، جفت‌شدگی فرومغناطیس و در صورتی که تعداد آن‌ها زوج باشد، جفت‌شدگی پادفرومغناطیس بین دو لایه آهن ایجاد می‌شود [۵-۸]. در این تحقیق، لایه نازک چندتایی Fe/Cr در دمای محیط و دمای زیرلایه  $450^{\circ}\text{C}$  به روش کندوپاش DC/RF لایه‌نشانی شدند. ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی ارزیابی شد و نتایج بدست آمده موفقیت لایه‌نشانی ساختار چند لایه  $\text{Fe}[\text{Fe}/\text{Cr}]_{45}$  را نشان دادند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

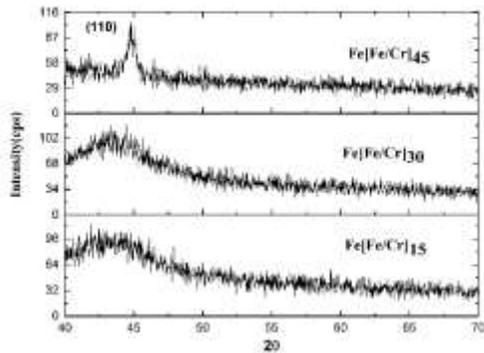
نمونه‌های چندلایه Fe/Cr از لایه‌نشانی آهن بر زیرلایه شیشه از طریق کندوپاش DC شروع و سپس لایه کروم با کندوپاش RF تشکیل گردید. لایه‌نشانی به صورت متوالی تحت فشار گاز آرگون در محدوده ۷-۳ mtorr، دمای زیرلایه  $250^{\circ}\text{C}$  و فاصله زیرلایه و هدف ۱۰ cm انجام شد که حدود ضخامت لایه آهن ۳ nm و کروم ۱ nm تو سط کریستال کوارتز تخمین زده شد. ساختار چندلایه  $\text{Fe}[\text{Cr}/\text{Fe}]_n$  با ۴۵، ۳۰ و ۱۵ n به عنوان تعداد لایه‌های آهن، مطابق جدول ۱ نام‌گذاری شدند. از آنجایی که صفحه نگهدارنده نمونه‌ها در دستگاه کندوپاش قابلیت چرخش را دارا بود، برای تهیه لایه نازک چندگانه Fe/Cr، لایه Fe تو سط سامانه کندوپاش DC لایه‌نشانی شد، سپس با چرخش نگهدارنده نمونه و قرار گرفتن در معرض سامانه کندوپاش RF، لایه‌نشانی کروم صورت گرفت و این فرآیند بصورت متوالی انجام شد. دمای  $450^{\circ}\text{C}$  نیز برای ساخت ساختار چند لایه بکار گرفته شد که نام‌گذاری این

مغناطومقاومت بزرگ<sup>۱</sup> GMR در لایه نازک چند تایی فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس با غلبه میدان مغناطیسی بر جفت‌شدگی آنتی فرومغناطیسی و موازی شدن بردار مغناطش لایه‌ها کاهش می‌یابد. انحراف اسپین وابسته به الکترون‌های هدایت در لایه‌های مغناطیسی یا فصل مشترک آن‌ها باعث اثر مغناطومقاومت بزرگ می‌شود [۱]، ضخامت لایه میانی غیر فرومغناطیس اثر مهمی بر جفت‌شدگی تبادلی بین لایه‌ای دارد. در واقع بزرگی جریان الکتریکی و مقاومت به جهت نسبی بردارهای مغناطش در لایه نازک وابسته است. چنانچه جهت نسبی بردارهای مغناطش دو لایه مغناطیسی مجاور، موازی یا پادموازی باشد، مقاومت الکتریکی به ترتیب کم یا زیاد خواهد شد. در حالت جفت‌شدگی پادفرومغناطیس، اگر میدان خارجی باعث موازی شدن جهت بردارهای مغناطش شود، آن‌گاه مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد [۳، ۴]. ذخیره‌سازهای مغناطیسی، حسگرهای جریان، حسگرهای شناسایی مولکولی در پزشکی، حسگرهای موقعیت‌یاب و تشخیص مین در فناوری‌های پیشرفته نظامی از جمله کاربردهای مغناطومقاومت بسیار بزرگ است [۱-۵].

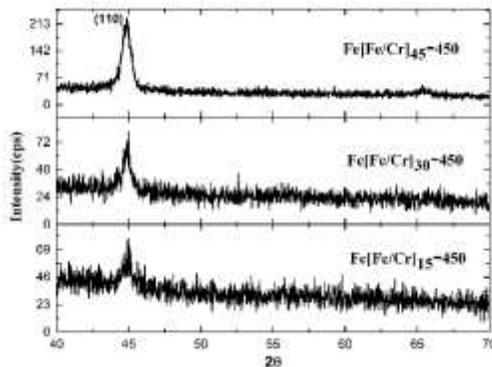
جفت‌شدگی تبادلی غیرمغناطیسی به معنای پادموازی شدن لایه‌های مغناطیسی نسبت به یکدیگر می‌باشد. مغناطومقاومت با ضخامت لایه مغناطیسی تغییر می‌کند، که از جفت‌شدگی اسپین‌ها در فصل مشترک لایه مغناطیسی و غیرمغناطیسی ناشی می‌شود. ترکیب شیمیایی لایه میانی و چگالی نسبی آن می‌تواند بر جهت‌گیری بردار مغناطش در دو لایه فرومغناطیس مؤثر باشد [۴]. بطور مثال لایه میانی طلا، جفت‌شدگی فرومغناطیس بین دو لایه آهن بوجود می‌آورد. از آنجایی که کروم دارای ساختمان بلوری مکعبی

<sup>۱</sup> Giant Magnetoresistance (GMR)

محاسبه است [۱۱، ۱۲]. تغییر زاویه صفحه (۱۱۰) در محدوده  $44/8^{\circ}\text{C} - 44/5^{\circ}$  رخ داده که ثابت شبکه در محدوده  $2/85 \text{ \AA} - 2/83 \text{ \AA}$  را ایجاد می‌کند، بنابراین تغییر ثابت شبکه باعث ایجاد  $0/84$  در صد کرنش یکنواخت می‌شود. علاوه بر تغییر ثابت شبکه، تبدیل شبکه آهن از bcc به fcc نیز در برخی گزارش‌ها بیان شده که با کاهش زاویه  $2\theta$  در الگوی پراش پرتو ایکس با زاویه خراشان مشخص می‌شود. ریزساختار سطح لایه نازک چندگانه در شکل ۳ برای نمونه‌های لایه نازک چندلایه Fe/Cr آورده شده است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌ها (شکل ۴)، دانه‌های شکل گرفته را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس چندلایه‌ای Fe[Fe/Cr]<sub>n</sub>.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس چندلایه Fe[Fe/Cr]<sub>n</sub>-450.

نمونه‌ها نیز مانند قبل با افزودن دمای حرارت‌دهی به شماره نمونه انجام شد. بطور مثال Fe[Fe/Cr]<sub>45-450</sub>، نمونه Fe[Fe/Cr]<sub>45</sub> عملیات حرارتی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. آزمون پراش پرتو ایکس گریزینگ با دستگاه Philips با تابش لامپ Cu K $\alpha$  با طول موج  $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$  در محدوده  $2\theta = 40^{\circ} - 70^{\circ}$  انجام شد. ویژگی‌های مغناطیسی با استفاده از دستگاه<sup>۱</sup> VSM مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار از دستگاه مغناطیس سنج TM-XYZTB-SIH با حداکثر میدان  $15 \text{ kOe}$  استفاده شد.

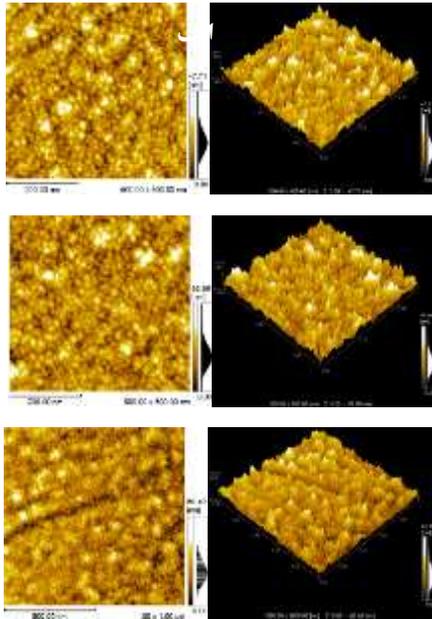
### ۳- نتایج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های Fe[Fe/Cr]<sub>15</sub>، Fe[Fe/Cr]<sub>30</sub> و Fe[Fe/Cr]<sub>45</sub> در شکل ۱، نشان‌دهنده صفحه (۱۱۰) در زاویه  $45^{\circ}$  برای هر سه نمونه است که با نتایج محققان دیگر نیز تطابق دارد [۹ و ۱۰]. تبلور نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. در تعداد لایه کمتر، صفحه (۱۱۰) به صورت پهن ظاهر شده و مقدار<sup>۲</sup> FWHM (پهنای پیک در نیمه ارتفاع بیشینه) بیشتر از چند درجه می‌باشد که نشان‌دهنده حالت آمورف لایه نازک است. این حالت برای نمونه Fe[Fe/Cr]<sub>45</sub> تغییر کرده و قله (۱۱۰) در زاویه  $2\theta = 45^{\circ}$  افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۲، با انجام لایه‌نشانی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، تبلور نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین صفحه (۱۱۰) در زاویه  $45^{\circ}$  و صفحه (۲۰۰) نیز در زاویه  $65/30^{\circ}$  برای نمونه Fe[Fe/Cr]<sub>45-450</sub> مشخص است. با افزایش دمای زیرلایه، صفحه (۱۱۰) به زوایای  $2\theta$  کمتری منتقل می‌شود، تغییر موقعیت ناچیز صفحه (۱۱۰) می‌تواند ناشی از وجود کرنش یکنواخت در پوشش باشد. میزان کرنش یکنواخت فشاری از طریق رابطه  $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_0} = \frac{\Delta d}{da_0}$  با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس قابل

<sup>۱</sup> Vibration Sample Magnetometer (VSM)

<sup>۲</sup> Full width at half maximum (FWHM)

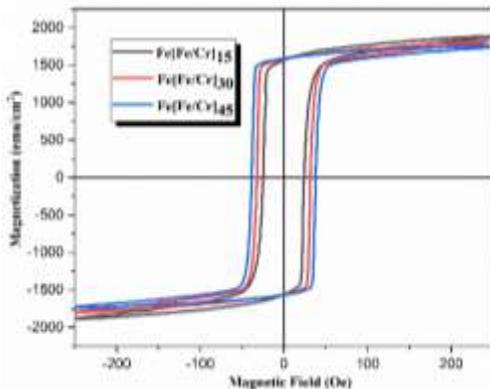
افزایش  $H_c$  مطابق با شکل ۴ و ۵، می‌تواند به رشد دانه‌ها و زبری سطح مربوط باشد، چنانچه در تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپی الکترونی روبشی به ترتیب رشد دانه و افزایش زبری از ۴۷ به ۸۰ نانومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی نمونه‌های الف-

۱۵  $Fe[Fe/Cr]$ ، ب-  $Fe[Fe/Cr]_{45}$  و ج-  $Fe[Fe/Cr]_{45}$  لایه‌نشانی شده در دمای  $۴۵۰^{\circ}C$ .

هر دو حالت تغییر نیروی پسماندزدا را توجیه می‌کند [۱۳]. تغییر مغناطش ساختار چند لایه  $Fe[Fe/Cr]_n$  نیز افزایش  $M_s$  و  $M_r$  را با افزایش تعداد لایه‌ها نشان می‌دهد [۴۸].

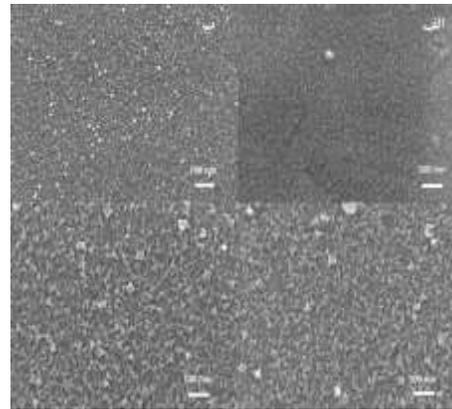


شکل ۵. منحنی‌های پسماند مغناطیسی ساختار چندلایه  $Fe[Fe/Cr]_n$ .

با افزایش تعداد لایه‌های کروم از ۱۵ به ۳۰ و ۴۵، رشد دانه‌ها به خوبی مشخص می‌باشد. دانه‌های مربعی یا لوزی شکل که در تصاویر مشخص است، می‌تواند مطابق رشد صفحه (۱۱۰) برای ساختار آهن BCC باشد که با نتایج الگوی پراش پرتو ایکس نیز تطابق دارد.

جدول ۱. نام‌گذاری لایه نازک چندتایی آهن/کروم

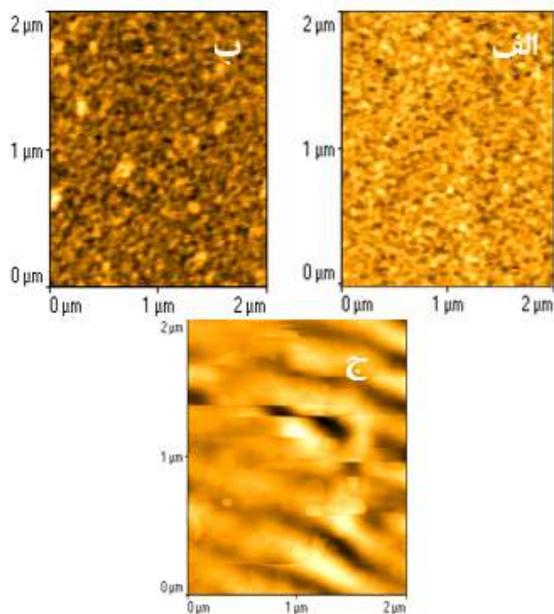
شماره نمونه	$Fe[Fe/Cr]_{15}$	$Fe[Fe/Cr]_{30}$	$Fe[Fe/Cr]_{45}$
تعداد لایه کروم	۱۵	۳۰	۴۵



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح نمونه‌های الف-  $Fe[Fe/Cr]_{15}$ ، ب-  $Fe[Fe/Cr]_{45}$ ، ج و د-  $Fe[Fe/Cr]_{15}$  و  $Fe[Fe/Cr]_{45}$  لایه‌نشانی شده در دمای  $۴۵۰^{\circ}C$ .

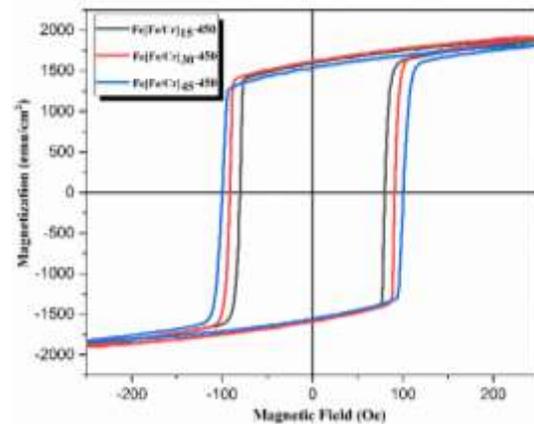
لایه‌نشانی شده در دمای  $۴۵۰^{\circ}C$  از طریق نفوذ اتم‌ها افزایش زبری سطح تا  $۸۰\text{nm}$  را ایجاد می‌کند و در تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی دوبعدی، جزایری را نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها، رشد این جزایر را به همراه دارد. افزایش تعداد لایه‌ها و همچنین لایه‌نشانی در دمای بالا، سبب به هم پیوستن جزایر و سطح پیوسته با زبری سطح کمتر می‌شود [۸۳]. افزایش تعداد لایه‌های چندگانه  $Fe/Cr$  از ۱۵ لایه به ۴۵ لایه سبب افزایش نیروی پسماند، مغناطش اشباع و مغناطش باقیمانده می‌شود، که این تغییرات ناچیز است. افزایش تعداد لایه از ۱۵ به ۴۵ لایه، باعث افزایش نیروی پسماندزدا مغناطیسی از حدود ۲۴ به  $۳۸\text{Oe}$  شد.

و جفت شدگی پادفرومغناطیس را می‌کاهد که به نفوذ اتم‌ها در دمای بالا مربوط است. افزایش تعداد لایه‌ها سبب افزایش زبری سطح ساختار چند لایه شده که در نهایت منجر به کاهش جفت‌شدگی پادفرومغناطیس خواهد شد. چنانچه مناطق روشن در تصویر میکروسکوپی نیروی مغناطیسی در شکل ۷ را حوزه‌های با اسپین بالا و مناطق تاریک، حوزه‌های با اسپین پایین در نظر گرفته شوند، رشد حوزه‌های مغناطیسی با افزایش تعداد لایه‌ها از ۱۵ به ۴۵ در ساختار  $Fe[Fe/Cr]_n$  مشخص است. در شکل ۷-ج مشاهده می‌شود، حوزه‌های شبه‌نواری با عرض حدود ۵۰۰ نانومتر تشکیل شده است. در بعضی مناطق شدت میدان بیشتر از دیگر نواحی است و سبب می‌شود که حوزه‌ها به لحاظ رنگ به صورت غیریکنواخت ظاهر شوند. بنابراین با افزایش تعداد لایه‌ها برای ساختار چندلایه  $Fe/Cr$ ، اندازه حوزه بزرگ‌تر شده و جهت مغناطش نمونه‌ها از حالت موازی با صفحه به تدریج با افزایش اندازه حوزه جهت‌دار می‌شود [۱۵].



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی نیروی مغناطیسی الف-  $Fe[Fe/Cr]_{15}$  و ب-  $Fe[Fe/Cr]_{45}$  ج-  $Fe[Fe/Cr]_{45-450}$ .

از آنجایی که نمونه  $Fe[Fe/Cr]_{45}$  دارای زبری بیشتری نسبت به سطح نمونه  $Fe[Fe/Cr]_{15}$  مطابق با شکل ۴ می‌باشد، می‌توان افزایش  $Mr$  را در اثر تغییر رفتار پادفرومغناطیس به فرومغناطیس در فصل مشترک دانست.



شکل ۶. منحنی‌های پسماند مغناطیسی ساختار چندلایه  $Fe[Fe/Cr]_n$ -450.

در ساختار ایده‌آل  $Fe/Cr$  با فصل مشترک صاف، انرژی‌های جفت‌شدگی فرومغناطیس  $Fe-Fe$ ، جفت‌شدگی آنتی فرومغناطیس  $Cr-Cr$  و جفت‌شدگی آنتی فرومغناطیس  $Fe-Cr$  به ترتیب ۱،  $-0/3$  و  $-0/18$  می‌باشند؛ بنابراین زبری سطح می‌تواند سبب از بین رفتن جفت‌شدگی پادفرومغناطیس شده و جفت‌شدگی تبدیلی فرومغناطیس رخ دهد [۱۴]. جفت‌شدگی فرومغناطیس  $Fe-Fe$  یا پادفرومغناطیس  $Cr-Cr$  و  $Fe-Cr$  می‌توانند مختل شوند. اغلب خنثی شدن یا از بین رفتن‌ها در مکان‌های  $Cr$  رخ می‌دهد زیرا جفت‌شدگی فرومغناطیس  $Fe-Fe$  قوی‌تر از جفت‌شدگی پادفرومغناطیس می‌باشد. افزایش دمای زیرلایه از ۲۵ به  $450^{\circ}C$ ، باعث افزایش نیروی پسماندزاد مغناطیسی از حدود ۸۱ Oe برای ۱۵ لایه آهن به ۱۰۱ Oe برای ۴۵ لایه شد. برای نمونه‌های لایه‌نشانی شده در دمای  $450^{\circ}C$ ، زبری سطح از ۴۷ به ۸۰ افزایش می‌یابد که می‌تواند به‌عنوان عامل موثر همراه با افزایش ضخامت به ارتقاء  $H_c$  کمک کند. دمای زیرلایه  $450^{\circ}C$ ، نسبت مربعی شدن منحنی پسماند را کاهش می‌دهد

### تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت و همکاری مسئولین و پرسنل محترم دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر اصفهان قدردانی می‌کنند.

### ۵- مراجع

- [1] Hishiyama Y, Kaburagi Y, Inagaki M. Magnetoresistance. Materials Science and Engineering of Carbon: Elsevier; 2016. p. 173-204.
- [2] Pomar TD, Erlandsen R, Zhou B, Iliushyn L, Bjørk R, Christensen DV. Extraordinary magnetometry: A review on extraordinary magnetoresistance. Applied Materials Today. 2024;38:102219.
- [3] Sato H. Giant Magnetoresistance: Metamagnetic Transitions in Metallic Antiferromagnets. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2001:3532-5.
- [4] Bass J. CPP magnetoresistance of magnetic multilayers: A critical review. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016;408:244-320.
- [5] Babanov YA, Devyaterikov D, Ustinov V. Modelless approach in X-ray reflectivity of multilayer nanoheterostructure Fe/Cr. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017;440:207-9.
- [6] Babanov YA, Ponomarev D, Devyaterikov D, Mukhamedzhanov EK, Borisov M, Ryabukhina M, et al. Depth-resolved local atomic structure of Fe/Cr multilayer film with GMR effect: Experimental results. Materials Science and Engineering: B. 2020;253:114247.
- [7] Kac M, Dobrowolska A, Polit A, Żukrowski J, Marszalek M. The influence of the atomic scale interface roughness on the GMR effect in Fe/Cr multilayers. Journal of Alloys and Compounds. 2020;824:153877.

هنگامی که اسپین در دو طرف یک دیواره به اندازه  $180^\circ$  تغییر جهت دهد، دیواره حوزه  $180^\circ$  با رفتار دیواره نیل<sup>۱</sup> را تشکیل می‌دهد. سطح مقطع دیواره حوزه به صورت یک خط صاف می‌باشد و در صورت خمیدگی می‌توان دید که قطب‌های مغناطیسی در قسمت خم، ایجاد شده و باعث افزایش وامغناطش در دیواره خواهد شد. بنابراین سطح مقطع این دیواره تمایل دارد به صورت خط مستقیم باشد [۱۶].

### ۴- نتیجه‌گیری

لایه نازک آهن، کروم به صورت  $n\text{Fe}[\text{Fe}/\text{Cr}]n$  با  $45, 30, 15$  و دماهای زیر لایه  $25$  و  $450^\circ\text{C}$  به روش کندوپاش DC/RF تهیه شدند. ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

- با افزایش تعداد لایه‌ها و دمای زیر لایه، تغییر موقعیت ناچیز صفحه (۱۱۰) می‌تواند ناشی از وجود کرنش یکنواخت در پوشش باشد.
- با افزایش تعداد لایه‌های کروم از  $15$  به  $30$  و  $45$ ، رشد دانه‌ها به خوبی مشخص می‌باشد.
- افزایش زبری سطح لایه نازک با افزایش تعداد لایه‌ها، بر ویژگی‌های مغناطیسی لایه نازک آهن و کروم تاثیرگذار است.
- افزایش دمای زیر لایه از  $25$  به  $450^\circ\text{C}$ ، باعث افزایش نیروی پسماندزداي مغناطیسی از حدود  $24$  Oe برای  $15$  لایه آهن به  $101$  Oe برای  $45$  لایه شد.
- تصاویر میکروسکوپی نیروی مغناطیسی حوزه  $180^\circ$  با رفتار دیواره نیل را برای لایه نازک آهن و ساختار چند لایه Fe/Cr نشان دادند.

<sup>۱</sup> Nile wall

- [8] Schad R, Belien P ,Verbanck G, Temst K, Fischer H, Lefebvre S, et al. Giant magnetoresistance in Fe/Cr superlattices with and without bulk scattering. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 1999;198:104-6.
- [9] Duc N, Tuan N, Nam N, Sinh N, Teillet J, Fnidiki A. Low-field magnetoresistance of Fe/Cr multilayers. *Physica B: Condensed Matter*. 2003;327(2-4):334-6.
- [10] Vitayaya O, Nehan PZZ, Munazat DR, Manawan MT, Kurniawan B. Magnetoresistance (MR) properties of magnetic materials. *RSC advances*. 2024;14(26):18617-45.
- [11] Chaoumead A, Sung Y-m, Kwak D-J. The effects of RF sputtering power and gas pressure on structural and electrical properties of ITiO thin film. *Advances in Condensed Matter Physics*. 2012;2012(1):651587.
- [12] Grumezescu V, Negut I. Nanocoatings and thin films. *Materials for Biomedical Engineering: Elsevier*; 2019. p. 463-77.
- [13] Al-Qawasmeh A, Badarneh MH, Obeidat A, Abedrabbo S. Surface roughness effects on magnetic properties of thin films: A computational Monte Carlo study. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022;562:169734.
- [14] Hopster H. Temperature dependent magnetic domain structure in ultrathin Fe films on Cr (100). *Journal of Applied Physics*. 2000;87(9):5475-7.
- [15] Bruno P, Renard J-P. Magnetic surface anisotropy of transition metal ultrathin films. *Applied Physics A*. 1989;49:499-506.
- [16] Zhao Y-P, Gamache R, Wang G-C, Lu T-M, Palasantzas G, De Hosson JTM. Effect of surface roughness on magnetic domain wall thickness, domain size, and coercivity. *Journal of Applied Physics*. 2001;89(2):1325-30.