

بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوساختار سه لایه‌ای Fe/Al/Fe بر روی سیلیسیوم

سید جعفر نظام دوست*

جهاد دانشگاهی استان مرکزی، اراک، ایران

چکیده: در این پژوهش، نتیجه‌های مربوط به تغییرهای ساختاری و ویژگی‌های مغناطیسی چند لایه‌ای Fe/Al/Fe رشد یافته بر روی زیرلایه Si(100) مورد مطالعه قرار گرفت. نانو لایه‌های نازک به روش کندوپاش مگنترونی RF لایه‌نشانی شدند به طوری که ضخامت هر لایه ۳۰ nm می‌باشد. نتیجه‌های تحلیل XRD نشان داد جهت ترجیحی سه لایه‌ای Fe/Al/Fe در راستای (200) می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی رفتار گرمایی در دماهای بالا در خلا دستگاه HT-XRD بین دماهای ۲۶ تا ۸۰۰ °C به مدت ۱۸۰ دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. در پایان برای بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی سطح و اندازه ذره‌ها از تحلیل AFM و برای بررسی ویژگی‌های مغناطیسی از تحلیل MFM و AGFM استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: سه لایه‌ای Fe/Al/Fe؛ فیلم نازک؛ پرتو ایکس در دماهای بالا.

KEYWORDS: Fe/Al/Fe trilayers; Thin film; X-ray diffraction in high temperature (HT-XRD).

مقدمه

در ساخت لایه‌های نازک نیز در سال‌های اخیر تحول‌های گسترده‌ای صورت گرفته است که خود ناشی از پیشرفت در فناوری خلاء، تولید میکروسکوپ‌های الکترونی و ساخت وسایل دقیق و پیچیده‌ی شناسایی مواد است. همچنین باز شدن مبحث‌هایی مانند میکروالکترونیک، اپتیک و نانوفناوری مدیون اهمیت پوشش‌های لایه نازک می‌باشد [۱، ۲]. از نقطه نظر تاریخی فناوری لایه نازک نخست در صنایع مدارهای مجتمع استفاده شد. در ادامه در ۴۰ سال اخیر، نیاز صنایع به ابزارهای کوچک‌تر و سریع‌تر، فناوری و فیزیک لایه‌های نازک را برای رسیدن به این هدف بهبود بخشید.

سامانه‌های چند لایه‌ای فلزی نازک، بیش‌تر در بازخوانی‌ها در دیسک‌های مغناطیسی و حسگرهای میدان مغناطیسی و همچنین در ثبت‌کننده‌های مغناطیسی به‌کار می‌روند. به‌تازگی مواد نانو ساختار، مانند آلایژهای مدوله شده به‌صورت کامپوزیت

در سال‌های اخیر، علم لایه‌های نازک رشد چشمگیری داشته و حجم گسترده‌ای از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. اولین روشی که منجر به تولید لایه نازک فلزی شد، در سال ۱۸۳۸ میلادی به روش الکترولیز بود. در قرن ۱۹ میلادی لایه نازک مایع از دیدگاه اپتیکی بسیار مورد توجه بود. رفته رفته با پیشرفت فناوری، در قرن ۲۰ میلادی تولید لایه نازک جامد رشد کرد. در اوایل قرن ۲۰ میلادی، با رشد فناوری میکروالکترونیک، ساخت لایه‌های نازک‌تر از ۱ میکرومتر (زیرمیکرونی) اهمیت ویژه‌ای یافت و در اواخر قرن ۲۰ با ظهور و پیشرفت مباحث نانومتری و پیدایش روش‌های شناسایی مانند XPS، تولید لایه‌ی نازک نانومتری (زیر ۱۰۰ نانومتر) پیشرفت چشمگیری پیدا کرد.

رشد چشمگیر ارتباطات، پردازش اطلاعات، ذخیره‌سازی، صفحه‌های نمایش، صنایع تزئینی، ابزارهای نوری، مواد سخت و عایق‌ها نتیجه تولید لایه‌های نازک براساس فناوری‌های نوین می‌باشد.

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: Nezamdoost@acecr.ac.ir

(۱۰۰) به عنوان زیرلایه‌هایی برای انباشت، مورد استفاده قرار گرفتند. پیش از قرار دادن نمونه‌ها در محفظه خلاء به منظور انجام H-terminate، سطوح زیرلایه به مدت یک دقیقه در محلول ده درصد HF قرار داده شدند و با شیوه‌های استاندارد مورد استفاده در فناوری میکروالکترونیک تمیز شدند. شرایط آزمایشگاهی به کار رفته در تهیه سه لایه‌ای در جدول ۱ بیان شده. ضخامت لایه‌ها با ضخامت سنج بلوری کوارتز تعیین شدند. بررسی ساختار بلوری و تحلیل ترکیب فازی لایه‌های نازک به وسیله دستگاه پراش سنج پرتو ایکس PHILIPS -X'Pert و تابش $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) تعیین شد.

نتیجه‌ها و بحث

مطالعه ویژگی‌ها ساختاری

بررسی نتیجه‌های به دست آمده از AFM

در اینجا به نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش میکروسکوپ نیروی اتمی در مورد سه لایه‌ای (ساندویچ) Fe/Al/Fe پرداخته می‌شود. در این آزمایش، مرکز تقریبی سطح نمونه با مساحتی به اندازه ۱۰ میکرومتر مربع روبش شده‌است. نتیجه‌های به دست آمده از این بررسی و تصویر فاز مربوطه، در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مقدار RMS محاسبه شده برای سه لایه‌ای ماده فلزی غیرمغناطیسی جداکننده از جنس آلومینیوم ۲/۱۵ نانومتر به دست آمد. از آنجا که AFM فقط ناهمواری‌های مربوط به بالاترین سطح نمونه را نشان می‌دهد، این مقدار زبری متعلق به لایه رویی یعنی آهن می‌باشد.

بررسی نتیجه‌های به دست آمده از الگوی XRD

نتیجه‌های الگوی XRD مربوط به سه لایه‌ای Fe/Al/Fe رشد داده شده بر روی زیرلایه سیلیسیوم در شکل ۲ نشان داده شده‌است. یک قله مشخص در زاویه $2\theta \approx 44.7^\circ$ درجه ناشی از انعکاس صفحه‌های آهن (۱۱۰) و آلومینیوم (۲۰۰) با ساختار مکعبی مرکز سطحی fcc ظاهر می‌شوند. همان‌گونه که دیده می‌شود، بازتاب مربوط به صفحه‌های (۲۰۰) بیش‌تر از سایر بازتاب‌ها است که این بدین معنا است که جهت ترجیحی راستای بلوری سه لایه Fe/Al/Fe در راستای (۲۰۰) می‌باشد. در شکل ۲ در زاویه‌های حدود 69.41° و 61.47° درجه قله مربوط به تک بلور سیلیسیوم به ترتیب با راستاهای ترجیحی (۱۱۱) و (۱۳۱)

و چند لایه‌ای‌ها به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴-۱]. در چند دهه اخیر پژوهش‌هایی بر روی ویژگی‌های مغناطیسی چند لایه‌ای‌های Fe/X/Fe به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌است، که می‌توان به طور شاخص به چند لایه‌های Fe/Al/Fe، Fe/Cu/Fe، Fe/Cr/Fe در این سال‌ها اشاره نمود [۸-۵].

این پژوهش‌ها به‌طور عمده مواردی همچون اثر دما، جفت شدگی تبادل می‌تواند میان لایه‌ای و اثر زیر لایه روی این ساختارها را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند [۱۰-۸].

هدف‌های اصلی در این پژوهش‌ها بررسی ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی (اثر GMR) و مکان‌شناسی سطوح است [۱۲، ۱۱]. البته ویژگی‌های مکانیکی این سطوح نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌است [۱۹-۱۳].

با وجود برخی محدودیت‌ها، مانند رسانش زیرلایه‌ها، شیوه‌های الکتروشیمیایی برای آماده‌سازی، چندلایه‌ای‌هایی مانند [۱۲ NiFe/Cu] و [۱۷ Ni/Cu]، [۱۸ NiCo/Cu]، [۱۹ Co/Cu] در دهه‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش، رشد سه لایه‌ای‌های Fe/Al/Fe بر روی ویفر سیلیسیوم به روش کندوپاش مگنترون گزارش شده‌است. مشخصه‌های نانو ساختاری چند لایه‌ای‌ها با پراش پرتو ایکس با زاویه بالا (XRD) و پراش پرتو ایکس در دمای بالا در محیط خلاء (HT-XRD) ارایه شده‌اند. هدف اصلی این کار، مطالعه سه لایه‌ای‌های Fe/Al/Fe رشد داده شده بر روی زیرلایه Si(100) هنگامی که در خلاء گرما داده شده‌اند، می‌باشد.

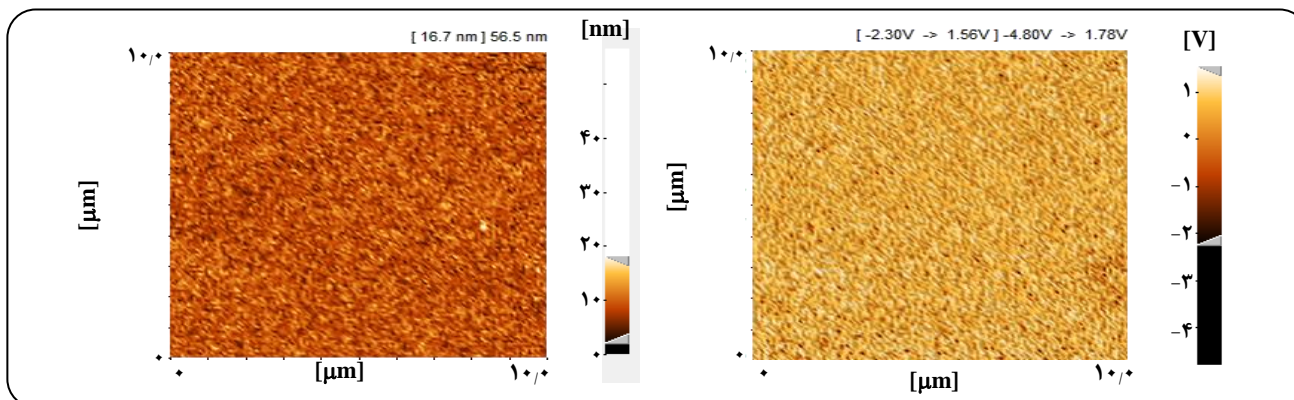
بخش تجربی

لایه‌های متناوب آهن و آلومینیوم بر روی زیرلایه‌هایی از جنس سیلیسیوم در دماهای متفاوت زیرلایه، با استفاده از روش کندوپاش مگنترون RF لایه‌نشانی شدند. برای رشد این سه لایه‌ای پس از آماده کردن زیرلایه از جنس سیلیسیوم نمونه‌ها درون محفظه قرار داده، فشار محفظه به ۱۰ میلی بار رسانده شد. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، زیر لایه‌ها پخته شد.

نخست Fe تبخیر شد تا به ضخامت ۳۰ nm برسد. پس از آن با استفاده از گزیننده، آلومینیوم انتخاب شد و تبخیر شد تا با ضخامت ۳۰ nm بر روی آهن نشانداده شود، دوباره گزیننده بر روی Fe قرار داده شد تا Fe با ضخامت ۳۰ nm بر روی آلومینیوم قرار گیرد. سپس ویفرهای تک بلور Si با جهت ترجیحی

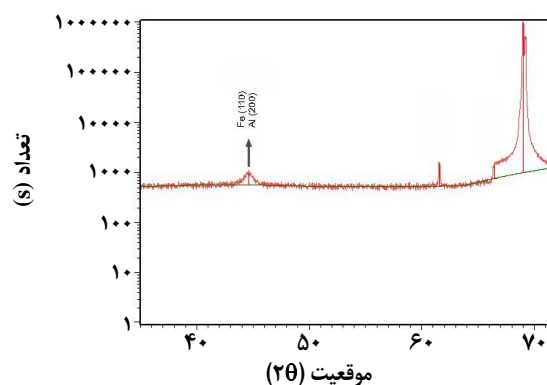
جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی به کاررفته در تهیه سه لایه‌ای.

آهنگ جریان جرمی	فاصله زیرلایه تا هدف	فشار گاز	فشار پایه
۲۰/۴ (cm ³ /min)	۰/۰۵۴ (m)	۶۰ (mbar)	۱۰ ^{-۶} (torr)



شکل ۱- تصویر AFM سه لایه‌ای Fe/Al/Fe (سمت چپ)، تصویر فاز سه لایه‌ای Fe/Al/Fe (سمت راست).

θ_B زاویه براگ است و $\langle D \rangle_{vol}$ با فرض کروی بودن بلورک‌ها، قطر ریز دانه‌ها می‌باشد. در این روش، از سایر علت‌های پهن‌شدگی مانند میدان‌های تنش‌ی ناهمگن چشم‌پوشی می‌شود. اهمیت روش XRD ناشی از این حقیقت است که با اندازه‌گیری ساده و تفسیر آن می‌توان پارامتری را به‌دست آورد که توصیف‌کننده میانگین ویژگی ریز ساختار است. با استفاده از معادله شرر و نتیجه‌های XRD اندازه ریز بلورک‌ها محاسبه شد و در جدول ۲ بیان‌ارایه شده.



شکل ۲- نمودار XRD گرفته شده از سه لایه‌ای Fe/Al/Fe بر روی سیلیسیوم.

بررسی نتیجه‌های XRD – HT

برای بررسی اثر دمای باز پخت و میزان برگشت پذیری ساختار نمونه‌ها در دماهای بالا از روش HTk در سامانه XRD استفاده شده است. سامانه HTk، لایه‌ها را در خلا بازپخت می‌کند و همزمان در دماهای خواسته شده طرح الگوی پراش آن‌ها را رسم می‌کند.

این سامانه قابل برنامه‌ریزی بوده و می‌توان شیب گرمایش و سرمایش را نسبت به زمان، مدت زمان بازپخت و دماهای مورد نیاز را در آن برنامه‌ریزی کرد. در این قسمت طیف‌های HT-XRD سه لایه‌ای‌های Fe/Al/Fe مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳ الگوی HT-XRD نمونه باز پخت شده به روش بالا از دمای ۲۶ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. در این نمودارها می‌توان جابه‌جایی قله‌ها را

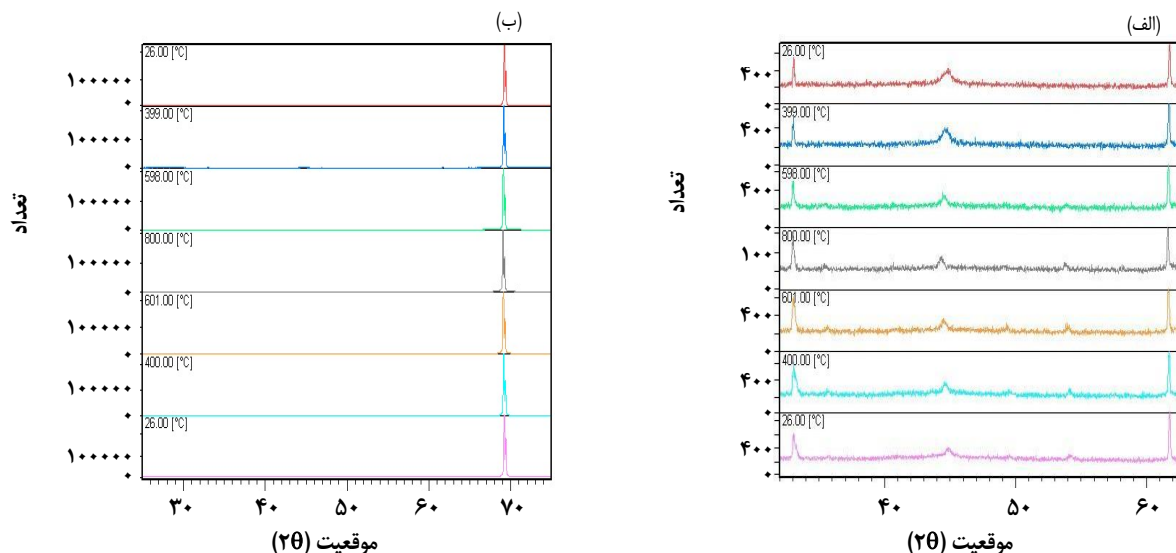
به طور کامل مشخص است. برای بررسی اندازه ذره‌ها نیز از رابطه‌ی دمای شرر استفاده شد. رابطه میان متوسط اندازه بلورک بر حسب آنگسترم و پهن‌شدگی در نصف شدت بیشینه (FWHM) بر طبق معادله شرر، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$B_{size} = \frac{k\lambda}{\langle D \rangle_{vol} \cos \theta_B} \quad (1)$$

در اینجا $(\lambda = 1.5406 \text{ \AA})$ طول موج پرتو ایکس است و B پهن‌شدگی در نصف شدت بیشینه برحسب رادیان به‌واسطه‌ی تأثیر اندازه‌ها است، K ثابتی است که مقدار آن به تقریب ۰/۹ است و

جدول ۲- اندازه ریزبلورکها با دما.

دما (سلسیوس)	۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰
اندازه ریزبلورکها (نانومتر)	۱۰,۸۸	۱۳,۲	۱۹	۲۸	۳۳	۳۵	۴۰	۴۲	۴۹

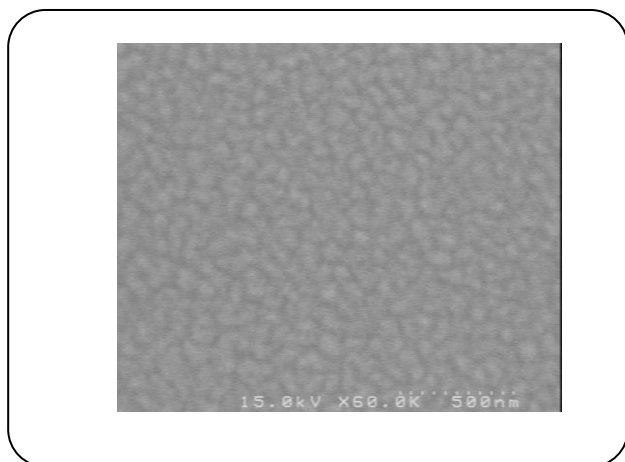


شکل ۳- طیف‌های (الف) XRD نمونه‌های باز پخت شده Fe/Al/Fe روی سیلیسیوم تا دمای 800°C در زمان سه ساعت و (ب) نمودار قسمت محدودی از طیف XRD در محدوده زاویه $2\theta = 32-63^{\circ}$.

با تغییر دما دید. این جابه‌جایی قله‌ها با دما می‌تواند نشانه وجود تنش و تجمع ناخالصی در بعضی از نقاط بافت در اثر افزایش دما باشد [۲۴ - ۲۰] همچنین با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که به ازای تغییرهای زیاد دما هیچ قله اضافی ایجاد نشده است.

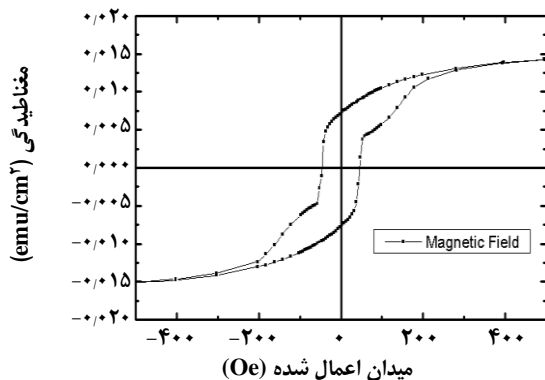
بررسی نتیجه‌های به دست آمده از تصویر SEM

در این قسمت به بررسی در این پژوهش برش عرضی از سه لایه‌ای به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) دانشگاه تهران ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند مدل XL-30 مورد مطالعه قرار گرفت. برای این بررسی‌ها، نمونه در امتداد قطر بریده شد و سپس به طریق مکانیکی پوشش شده و نمونه به منظور افزایش کیفیت لایه نازک سطوح، به روش الکتروشیمیایی تمیز و بدون هر نوع ناخالصی شد. در شکل ۴ تصویر SEM مربوط به ریخت‌شناسی سطح نمونه انباشت شده سه لایه Fe/Al/Fe بر روی سیلیسیوم در مقیاس 500nm و بزرگنمایی $60000\times$ مرتبه را می‌بینند. در این تصویر می‌توان دید که شکل دانه‌های تشکیل شده کروی شکل است. این تصویر نشان می‌دهد که لایه نازک



شکل ۴- تصویر SEM نمونه انباشت شده سه لایه‌ای Fe/Al/Fe بر روی سیلیسیوم در مقیاس 500nm و بزرگنمایی $60000\times$ مرتبه.

ساخته شده دارای سطحی به نسبت یکنواخت بوده و اندازه میانگین دانه‌ها در حدود ۱۱ نانومتر است. شایان ذکر است که یکنواختی سطح به دلیل زمان انباشت بالا و چگالی جریان بالا و غلظت پایین می‌باشد [۲۶، ۲۵].



شکل ۵ - منحنی پسماند سه لایه ای Fe/Al/Fe بر روی زیر لایه Si.

مشاهده‌ها همچنین ثابت می‌کنند که در نمونه‌های فرومغناطیسی می‌توان حضور نداشتن خوشه‌های آهن خیلی کوچک و اتم‌های آهن منزوی در داخل میان‌لایه‌های آلومینیوم را دیده و در نتیجه حالت نزدیک به ابر پارامغناطیسی را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مقادیرهای مربوط به باقیمانده مغناطیسی (Mr)، مغناطیسی اشباع (Ms)، میدان اشباع (Hm)، میدان وادارندگی (Hc) و تراوایی مغناطیسی (μ) مربوط به چند لایه‌های Fe/Al/Fe ارایه شده است.

بررسی نتیجه‌های به دست آمده از MFM

در این قسمت با استفاده از نقش حوزه های مغناطیسی در تصویرهای به دست آمده از MFM، ساختار حوزه‌های مغناطیسی مربوط به سه لایه‌ای Fe/Al/Fe مورد بررسی قرار گرفته است. تصویرهای حوزه‌های مغناطیسی به دست آمده از سطح‌های نمونه‌ها (MFM) در شکل ۶ نشان داده شده است. دستگاه MFM در یک تکنیک غیرتماسی، دو عبوری DUAI-PASS با نوک‌های پوشش داده شده با CoCr که به‌طور عمودی مغناطیس شده‌اند، عمل می‌کند. در تصویرهای گرفته‌شده، فاصله نوک تا سطح نمونه‌ها یا ارتفاع اسکن ۵ میکرومتر می‌باشد. ناحیه‌های تاریک و روشن در تصویرهای MFM حاکی از موقعیت و اندازه حوزه‌های مغناطیسی مربوط به اسپین‌های هم جهت (به سمت پایین و بالا) لایه فرومغناطیس آهن می‌باشند. با توجه به تصویرهای به دست آمده از تصویر برداری MFM، میانگین پهنای حوزه‌های مغناطیسی برای سه لایه‌های Fe/Al/Fe، حدود ۲ نانومتر به دست آمده است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده می‌توان بیان نمود که زبری،

مطالعه ویژگی‌های مغناطیسی

بررسی نتیجه‌های به دست آمده از AGFM

به منظور بررسی ویژگی‌های مغناطیسی سه لایه‌ای‌های Fe/Al/Fe و تأثیر لایه‌های غیرمغناطیسی، منحنی پسماند مغناطیسی نیز با استفاده از دستگاه AGFM به دست آمد. به عنوان نمونه ضخامت لایه‌های غیرمغناطیسی به اندازه حدود ۲۰ نانومتر با جفت‌شدگی پادفرومغناطیسی در بین لایه‌های Fe (برای سامانه‌هایی که در آن نوسان‌های دوره‌ای کوتاه به دلیل نقص‌های ساختاری به دست نمی‌آیند) منطبق است. این چنین خاصیت فرومغناطیسی بر وجود محوری آسان از مغناطیسی در امتداد جهت (۱۱۰) حکایت دارد و نیز به واسطه‌ی ناهمسانگردی تک محوری از محور آسان مربوط به جهت (۱۱۰) دلالت خواهد داشت که بر ناهمسانگردی ۴ گانه موجود در لایه‌های Fe(۱۰۰) با ساختار مکعبی که روی سیلیسیوم رشد داده شده، غالب است.

در اینجا لایه بالایی آهن، با ساختار پادفرومغناطیسی زیرین به بین حالت‌های فرومغناطیسی و پاد فرومغناطیسی بسته به تغییر ضخامت لایه غیرمغناطیسی نوسان خواهد کرد. قدرت جفت‌شدگی بین لایه‌ای در ضخامت‌هایی از لایه غیرمغناطیسی که در آن علامت جفت‌شدگی تغییر می‌کند، ضعیف است. باید توجه داشت که برای لایه‌های خیلی باریک لایه غیرمغناطیسی با ضخامت‌های خیلی کم (بسته به زبری یا صافی سطح Fe)، لایه‌های آهن یا صورت فرومغناطیسی جفت می‌شوند یا جفت نشده باقی می‌مانند. بنابراین حلقه پسماندی که در اینجا اندازه‌گیری شده است، تنها با لایه Fe بالایی متناظر است، زیرا سیگنال‌های مربوط به لایه‌های Fe پایینی ساختار Fe/Al/Fe صفر است.

در شکل ۵ تصویر مربوط به حلقه‌های پسماند چند لایه‌ای Fe/Al/Fe بر روی زیر لایه سیلیسیوم نشان داده شده‌اند. با اعمال میدان مغناطیسی خارجی در راستای (۱۱۰) و پس از آن که لایه آهن بالایی به حالت اشباع رسید (در میدان حدود ۴۵۰ Oe)، سیگنال ثابت می‌ماند تا این که میدان به مقداری برسد که در آن اسپین‌ها در ساختار زیرین تغییر جهت داده و دوباره به حالت اشباع رسیده و ساختار به طور کامل اشباع می‌شود. این امر به روشنی ثابت می‌کند که مغناطیسی موجود در لایه‌های Fe و ساختار پاد فرومغناطیسی Fe/Al/Fe در جهت‌های مخالف یکدیگر می‌باشند.

جدول ۲- مقدارهای باقیمانده مغناطیدگی (Mr)، مغناطیدگی اشباع (Ms)، میدان اشباع (Hm)، میدان وادارندگی (Hc) و تراوایی مغناطیسی (μ) در سه لایه ای Fe/Al/Fe.

Fe/x/Fe	M_r	M_s	H_c	H_m	$\mu = M_s/H_m$
Fe/Al/Fe	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۴	۵۰	۴۰۰	۰٫۰۰۰۳۵

از الگوی HT-XRD می توان جابه جایی قله ها را با تغییر دما دید. که این جابه جایی قله ها با دما نشانه وجود تنش و تجمع ناخالصی در برخی نقطه های بافت در اثر افزایش دما می باشد. همچنین با توجه به نمودارها می توان نتیجه گرفت که به ازای تغییرهای زیاد دما هیچ قله اضافی ایجاد نشده است.

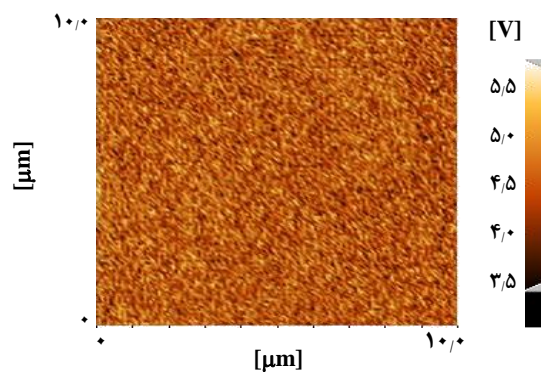
در بررسی تصویرهای SEM نمونه می توان دید که شکل دانه های تشکیل شده کروی شکل است. نتیجه ها نشان می دهد که لایه نازک ساخته شده دارای سطحی به نسبت یکنواخت بوده که این یکنواختی سطح به دلیل زمان انباشت بالا و چگالی جریان بالا و غلظت پایین می باشد و اندازه میانگین دانه ها در حدود ۱۰ نانومتر گزارش شد.

تحلیل ویژگی های مغناطیسی

با توجه به نتیجه های تصویر برداری MFM، میانگین پهنای حوزه های مغناطیسی برای این سه لایه ای ها، حدود ۲ نانومتر به دست آمده است. با توجه به بررسی ها می توان نتیجه گرفت که زبری، شرایط رشد، میزان بازپخت و دمای زیرلایه پیش از و هنگام رشد بر شکل و پهنای حوزه های مغناطیسی موثر خواهد بود.

نتیجه های مربوط به حلقه پسمانه چند لایه ای Fe/Al/Fe بر روی زیر لایه سیلیسیوم ثابت می کند که مغناطیدگی موجود در لایه های Fe و ساختار پاد فرو مغناطیسی Fe/Al/Fe در جهت های مخالف یکدیگر می باشند.

مشاهده همچنین ثابت می کند که در نمونه های فرومغناطیسی می توان حضور نداشتن خوشه های آهن خیلی کوچک و اتم های آهن منزوی را در داخل میان لایه های آلومینیوم را دید و در نتیجه حالت نزدیک به ابر پارامغناطیسی را نشان می دهد.



شکل ۶- تصویر MFM سه لایه ای Fe/Al/Fe.

شرایط رشد، میزان بازپخت و دمای زیرلایه پیش و هنگام رشد هم در روش کندوپاش و هم تبخیر گرمایی، بر شکل و پهنای حوزه های مغناطیسی موثر خواهند بود.

اندازه گیری ها روی نمونه های گوناگون مغناطیسی، نشان می دهد که فاصله بین نوک سوزن و وضعیت موثر گشتاور مغناطیسی در نوک، به ویژگی های مغناطیسی سطح اندازه گیری شده بستگی خواهد داشت و در نتیجه گشتاور مغناطیسی محاسبه شده از داده های MFM باید فقط به عنوان یک برآورد تقریبی در نظر گرفته شود. در نتیجه گشتاور مغناطیسی محاسبه شده از دیتای MFM مشخصه های مکان شناسی سطح، اطلاعات اضافی چشمگیری در رابطه با نمونه های سطح ارایه می دهد.

نتیجه گیری

تحلیل ویژگی های ساختاری

در این پژوهش سه لایه ای Fe/Al/Fe رشد یافته بر زیرلایه ای سیلیسیوم مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه های الگوی ساختار بلوری سه لایه ای Fe/Al/Fe نشان داد که یک قله مشخص در زاویه $2\theta = 44.7^\circ$ ناشی از انعکاس صفحه های آهن (۱۱۰) و آلومینیوم (۲۰۰) با ساختار مکعبی مرکز سطحی fcc ظاهر می شود. همچنین نشان داد جهت ترجیحی راستای بلوری سه لایه ای Fe/Al/Fe در راستای (۲۰۰) می باشد. از نمودارهای به دست آمده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹

مراجع

- [1] Wang Y., Gao H., Han Y., Dai Y., Wang J., Sun B., [First-Principles Study on the Solubility of Iron in Dilute Cu-Fe-X Alloys](#), *Journal of Alloys and Compounds*, 992-996 (2017).
- [2] Callori S.J., Chao K.H., Causer G.L., Nagy B., [Fe/FeO/Fe/FeV Multilayers Characterized by Magnetometry and Polarized Neutron Reflectometry](#), *IEEE Magnetics* (2017).
- [3] Géranton G., Zimmermann B., Long N.H., Mavropoulo P., [Nonlocal Fieldlike Spin-Orbit Torques in Rashba Systems: Ab initio Study of a Ag 2 Bi-Terminated Ag \(111\) Film Grown on a Ferromagnetic Fe \(110\) Substrate](#), *Physical Review B* (2017).
- [4] Koziol-Rachwał A., Skowroński W., Frankowski M., [Interlayer Exchange Coupling, Dipolar Coupling and Magnetoresistance in Fe/MgO/Fe Trilayers with a Subnanometer MgO Barrier](#), *Journal of Magnetism*, 912-916 (2017).
- [5] Hotta Y., Yamada M., Suzuki A., [Structure of Sm-Co/Fe-Co Multilayer Films with in-Plane Magnetic Anisotropies Prepared on MgO \(110\) Single-Crystal Substrates](#), *Journal of Magnetism*, **400**(15): 253-261 (2016).
- [6] Zhang L., Liu L., Ishio S., [Investigation of Magnetic Anisotropy and Magnetization Process of Tetragonal Distorted FeCo Multilayer Films](#), *Materials Letters*, **126**(1): 105-108 (2015).
- [7] Rodmacq B., Auffret S., Dieny B., Nistor L.E., Commissariat A L'Energie Atomique Et Aux Energie Alternatives and Centre National De La Recherche, [Three-Layer Magnetic Element, Magnetic Field Sensor, Magnetic Memory and Magnetic Logic Gate Using Such an Element](#), *U.S. Patent 8,913-924* (2013).
- [8] Filipkowski M.E., Gutierrez C.J., Krebs J.J., Prinz G.A., [Temperature Dependence of the 90° Coupling in Fe/Al/Fe \(001\) Magnetic Trilayers](#), *Journal of Applied Physics*, **73**(10): 5963-5965 (1993).
- [9] Fallarino L., Sluka V., Kardasz B., Pinarbasi M., Berger A., Kent A.D., [Interlayer Exchange Coupling between Layers with Perpendicular and Easy-Plane Magnetic Anisotropies](#), *Applied Physics Letters*, **109**(8): 082401 (2016).
- [10] Pertsev N.A., Kohlstedt H., [Resistive Switching Via the Converse Magnetoelectric Effect in Ferromagnetic Multilayers on Ferroelectric Substrates](#), *Nanotechnology*, **21**(47): 475202 (2010).
- [11] Ludwig K., Hauch J., Mattheis R., Barholz K.U., Rieger G., [Adapting GMR Sensors for Integrated Devices](#), *Sensors and Actuators A: Physical*, **106**(1): 15-18 (2003).
- [12] Quach D.T., Tran Q.H., Møhave K., [Perpendicular Magnetic Anisotropy and the Magnetization Process in CoFeB/Pd Multilayer Films](#), *Journal of Physics D*, **116**(1): 115-118 (2014).
- [13] Giannopoulos G., Salikhov R., Reichel L., [Inducing High Coercivity and Anisotropy into Strained Fe-Co Thin Films, Towards Rare Earth Free Permanent Magnets Applications](#), *Magnetics - ieeexplore.ieee.org* (2015).

- [14] Larysa Tryputen, Feng Guo, Frank Liu, T. N. Anh Nguyen, Majid S. Mohseni, Sunjae Chung, Yeyu Fang, Johan Åkerman, R. D. McMichael, and Caroline A. Ross, [Magnetic Structure and Anisotropy of \[Co/Pd\] 5/NiFe Multilayers](#). *Physical Review B*, **145**(4): 711-720 (2015).
- [15] Razeghizadeh A., Zalaghi L., Kazemnejad I., Rafee V., [Growth and Optical Properties Investigation of Pure and Al-doped SnO₂ Nanostructures by Sol-Gel Method](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **36**(5): 1-8 (2017).
- [16] A Dehbi, B Youssef, C Chappey, AHI Mourad, [Multilayers Polyethylene Film for Crop Protection in Harsh Climatic Conditions](#). *Advances in Materials*, **50**(11): 591-60 (2017).
- [17] Nabiyouni G., Schwarzacher W., [Growth, Characterization and Magnetoresistive Study of Electrodeposited Ni/Cu and Co-Ni/Cu Multilayers](#), *Journal of Crystal Growth*, **275**(1): e1259-e1262 (2005).
- [18] Gomez E., Pane S., Valles E., [Electrodeposition of Co-Ni and Co-Ni-Cu Systems in Sulphate-Citrate Medium](#), *Electrochimica Acta*, **51**(1): 146-153 (2005).
- [19] Zhang L., Li M., Wang X., Zheng H., Wang N., [Magnetic Properties of Ferromagnetic Microstructured Multilayer Films](#). *IEEE Magnetics ... - ieeexplore.ieee.org*, **551**(1): 246-253 (2016).
- [20] Fan J.P., Zhang X.Y., Jiang Y.N., Liang R.Y., [Optimization of Energy Product and Reversal Process for Nd₂Fe₁₄B/α-\(FeCo\)₁₆N₂/Nd₂Fe₁₄B Exchange-Spring Trilayer Films](#), *Journal of Magnetism*, **80**(14): 781-789 (2017).
- [21] Kerstan M., Müller M., Rüsse Ch., [High Temperature Thermal Expansion of BaAl₂Si₂O₈, CaAl₂Si₂O₈, and Ca₂Al₂SiO₇ Studied by High-Temperature X-Ray Diffraction \(HT-XRD\)](#), *Solid State Sciences*, **38**: 119-123 (2014).
- [22] Kim M.J., Lee J.J., Lee S.H., Sohn S.H., [Study of CdTe/CdS Heterostructure by CdCl₂ Heat Treatment via in Situ High Temperature XRD](#), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **109**: 209-214 (2013).
- [23] Bhagat R.K., Krishnan K., Kutty T.R.G., Kumar A., Kamath H.S., Banerjee S., [Thermal Expansion of Simulated Thoria-Urania Fuel by High Temperature XRD](#), *Journal of Nuclear Materials*, **422**(1-3): 152-159 (2012).
- [24] Lakshmanan S., Rao S.K., Muthuvel M.R., [Variable Substrate Temperature Deposition of CoFeB Film on Ta for Manipulating the Perpendicular Coercive Forces](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, **435**(1): 81-86 (2017).
- [25] Wei Y., Shao W., Ma Z., Chen Z., Lu W., [Preparation and Thermal Stability of an Atomically Sharp Fe/Al Interface](#). *Materials Letters*, **185**(15) 537-540 (2016).
- [26] Chen Y., Liu Y., Sun C., Yu K.Y., Song M., Wang H., Zhang X., [Microstructure and Strengthening Mechanisms in Cu/Fe Multilayers](#), *Acta Materialia*, **60**(18): 6312-6321 (2012).

- [27] Almasi-Kashi M., Ramazani A., Kheyri F., Jafari-Khamse E., [The Effect of Magnetic Layer Thickness on Magnetic Properties of Fe/Cu Multilayer Nanowires](#), *Materials Chemistry and Physics*, **144**(3): 230-234 (2015).
- [28] Egelhoff Jr, W.F. and Kief, M.T., [Antiferromagnetic Coupling in Fe/Cu/Fe and Co/Cu/Co multilayers on Cu \(111\)](#). *Physical Review B*, **45**(14): 7791-7799 (1992).
- [29] Gomez E., Pane S., Valles E., [Electrodeposition of Co-Ni and Co-Ni-Cu Systems in Sulphate-Citrate Medium](#), *Electrochimica Acta*, **51**(1): 146-153 (2005).
- [30]. YJ Eum, SO Hwang, CY Koo, JY Lee, HY Lee..., [Effect of Annealing Temperature on the Magnetoelectric Properties of CoFe₂O₄/Pt/Pb \(Zr_{0.52}Ti_{0.48}\) O₃ Multilayer Films](#), *Journal of the Korean*, **87**(14): 191-200 (2014).