

مشخصه‌یابی و مطالعه ناهمواری سطحی بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co- Cu/Cu الکتروانباشت شده بر زیر لایه شیشه/طلا

غلامرضا نبیونی، طاوس حسین آباد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران

کامبیز هدایتی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۲۵ - پذیرش مقاله : ۹۵/۰۹/۰۷)

چکیده

در این پژوهش بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu بر روی زیر لایه شیشه /طلا به روش الکتروانباشت لایه‌نشانی گردید. ناهمواری‌های سطحی این لایه‌ها به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شده و سپس با رسم نمودار ناهمواری سطحی بر حسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی نوع و اندازه ناهمواری‌های سطحی مورد محاسبه قرار گرفت. ساختار بس لایه‌ها توسط پراش اشعه ایکس مورد مطالعه قرار گرفت و پیک‌های مشخصه و ساختار بلوری لایه‌ها بدست آمد. رابطه بین ضخامت لایه‌های مغناطیسی و میزان درصد جرمی کبالت انباشت شده در هر دو بس لایه توسط آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس بررسی شد. پس از آن اندازه و شکل دانه‌ها و رابطه آن با ضخامت و مواد سازنده بس لایه‌ها در هر یک از بس لایه‌های مغناطیسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. در نهایت خواص مغناطیسی بس لایه‌ها و منحنی پسماند آن‌ها در حالت موازی بر سطح مورد مطالعه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: الکتروانباشت، بس لایه، Co-Cu/Cu، Fe-Co-Cu/Cu

Characterization and Kinetic Roughening Study Electrodeposited Co-Cu/Cu and Fe-Co-Cu/Cu Multilayers on Glass/Au Substrate

Gholamreza Nabyouni, Tavus Hosseinabad

Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak Iran

Kambiz Hedayati

Department of Physics, Faculty of Science, Arak University of Technology, Arak Iran

(Received 14 Feb 2016, accepted 27 Nov 2016)

Abstract

In this research Co-Cu/Cu and Fe-Co-Cu/Cu multilayer were electrodeposited on sputtered gold on glass substrates. The kinetic roughening of samples was investigated by atomic force microscopy (AFM) images and the logarithmic scale plots of roughness as a function of scan lengths. The XRD patterns indicate the multilayer thin films follow their substrate textures. The EDX results show that in both Co-Cu/Cu and Fe-Co-Cu/Cu multilayers the Co content increases as the magnetic layer thickness increasing. The SEM images show that increasing the magnetic and nonmagnetic layers thicknesses leads to increase the grain size of multilayers. The Magnetic property studies of samples reveal that the coercivity decreases and the remanence increases by presenting of Fe in magnetic multilayers.

Keywords: Electrodeposition, Multilayer, Co-Cu/Cu, Fe-Co-Cu/Cu.

E-mail of corresponding author: g-nabyouni@araku.ac.ir

مقدمه

دو فلز باعث لایه‌نشانی بس لایه می‌گردد. با پایین نگه داشتن غلظت یون A در الکترولیت می‌توان مقدار فلز A را در لایه‌ای که شامل آلیاژ A-B است، پایین نگه داشت [۶].

با توجه به آنکه در روش الکتروانباشت امکان رشد بس لایه‌ای‌ها با تعداد بسیار بالای لایه و در زمان کوتاه در حد کمتر از یک دقیقه و بدون نیاز به شرایط خاص مانند خلاء و اعمال دما وجود دارد، این روش نسبت به سایر روش‌های لایه نشانی مثل کندوپاش از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا در سایر روش‌ها رشد تعداد بسیار بالا از لایه‌ها (در این پژوهش ۲۰۰ لایه) بسیار دشوار و در برخی موارد غیر قابل انجام است.

در این پژوهش بس لایه‌های فرومغناطیس/غیرمغناطیسی Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu با روش ذکر شده انباشت داده شدند.

ناهمواری‌های سطحی در گستره وسیعی از مواد که از سطح آن‌ها ماده کنده یا به آن اضافه می‌شود، بررسی می‌شود. ناهمواری‌های سطحی لایه‌ها بر حسب ضخامت و پهنای منطقه اسکن با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$w(l,t) = \sqrt{\langle [h(t) - \langle h(t) \rangle]^2 \rangle} \quad (1)$$

که h ارتفاع هر نقطه‌ی سطح، l طول اسکن و t ضخامت لایه یا زمان انباشت آن است [۷]. در مقیاس رشد بهنجار، $w(l,t)$ برای طول‌های اسکن کوچک و بزرگ با روابط زیر مشخص می‌شوند:

$$w(l,t) \propto l^H \quad \text{for } l \ll l_c \quad (2)$$

$$w(l,t) \propto t^\beta \quad \text{for } l \gg l_c$$

که H مؤلفه هارست، l_c طول متقاطع و β مؤلفه رشد است.

برای تعدادی دیگری از سیستم‌های واقعی دیگر ناهمواری‌های سطحی از روابط زیر پیروی می‌کنند:

$$w(l,t) \propto l^H t^{\beta_{bc}} \quad \text{for } l \ll l_c \quad (3)$$

$$w(l,t) \propto t^{\beta + \beta_{bc}} \quad \text{for } l \gg l_c$$

در طول سال‌های اخیر بس لایه‌های فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی به علت کاربردهای جالب و متعددی که در سنسورهای مغناطیسی و وسایل ضبط مغناطیسی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱].

بس لایه‌ها یا ابر شبکه‌ها معمولاً توسط تکنیک‌های انباشت در خلاء همانند برآرایی باریکه مولکولی [۲] و کندوپاش [۳] رشد داده می‌شوند. همچنین جهت رشد بس لایه‌های فلزی/فلزی از روش الکتروانباشت استفاده می‌گردد.

الکتروانباشت به انباشت یک ماده خالص یا آلیاژی از یک محلول الکترولیت به وسیله عبور جریان الکترونیکی از دو یا سه الکتروود اتلاق می‌شود. کاتد یا الکتروود کار همان زیر لایه مورد استفاده در لایه نشانی است که می‌تواند یک لایه رسانا یا نیم‌رسانا باشد. آند یا الکتروود ثانویه چرخه واکنش اکسایش را کامل کرده و معمولاً یک ورقه از جنس پلاتین است. معمولاً از الکتروود کالومل اشباع به عنوان الکتروود مرجع استفاده می‌شود و پتانسیل بین الکتروود کار و الکتروولیت را ثابت نگه می‌دارد. یک دستگاه پتانسیواستات اختلاف پتانسیل بین الکتروود کار و الکتروود مرجع را اندازه گیری می‌کند و با اعمال اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد باعث ایجاد چگالی جریان در الکتروولیت و لایه‌نشانی می‌شود [۴ و ۵].

الکتروانباشت یک آلیاژ یا بس لایه توسط الکتروولیتی که حاوی یون‌های فلزات تشکیل‌دهنده آلیاژ است با استفاده از تغییر پتانسیل یا چگالی جریان انباشت اعمال شده زیر لایه امکان‌پذیر است.

برای الکتروانباشت یک بس لایه یا ابر شبکه از یک الکتروولیت که شامل یون‌های A و B است، لازم است که فلز A از فلز B نجیب‌تر باشد به آن معنا که احتیاج به پتانسیل منفی کمتری برای انباشت داشته باشد. دستگاه پتانسیواستات با تغییر بین یک پتانسیل منفی کافی برای کاهش فقط فلز A و یک پتانسیل منفی برای کاهش هر

هریک از بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu به صورت ۱۰۰ دولایه ای به ضخامت‌های ۵ نانومتر/۳ نانومتر، ۵ نانومتر/۲ نانومتر و ۴ نانومتر/۲ نانومتر انباشت داده شد.

ناهمواری‌های سطح لایه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی در مد ضربه‌ای و با کیفیت 256×256 پیکسل مورد بررسی قرار گرفت. ساختار بلوری هر یک از بس لایه‌های الکتروانباشت شده توسط پراش اشعه ایکس و با تابش $\text{Cu } K\alpha (\lambda=1.54\text{\AA})$ مطالعه گردید. میزان ترکیب عناصر در بس لایه‌ها توسط آنالیز تفکیک انرژی اشعه ایکس بررسی شد. مورفولوژی سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. خواص مغناطیسی و منحنی پسماند بس لایه‌ها توسط مغناطومتر نیروی گرادیان متناوب اندازه‌گیری گردید.

کارهای محاسباتی

برای مطالعه ناهمواری‌های سطحی بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu از آنالیز تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده گردید. داده‌های میکروسکوپ نیروی اتمی توسط نرم‌افزار WSxM مورد مشاهده و بررسی قرار گرفت. برای محاسبه ناهمواری‌های سطحی لازم است اطلاعات تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی را به صورت داده‌های عددی داشته باشیم. با توجه به آنکه میکروسکوپ نیروی اتمی برای هر نقطه از سطح نمونه در صفحه x-y یک ارتفاع Z را اندازه‌گیری می‌کند، با استفاده از نرم‌افزار WSxM اطلاعات هر یک از تصاویر را به صورت داده‌های سه ستونی شامل x، y و Z ذخیره می‌کنیم تا از آن‌ها برای محاسبه ناهمواری‌های سطحی استفاده گردد.

داده‌های بدست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی برای محاسبه ناهمواری‌های سطحی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن استفاده شد. به این منظور توسط رابطه ۱ ناهمواری‌های سطحی را برحسب طول اسکن

که β_{10c} مؤلفه ناهمواری‌های منطقه‌ای نامیده می‌شود و نشان‌دهنده چگونگی تغییرات ناهمواری‌ها بر اساس ضخامت لایه است. اگر β_{10c} غیر صفر باشد، به این سیستم‌ها نابهنجار گفته می‌شود [۸-۹].

به دلیل اهمیت ناهمواری‌های سطحی و جنس آلیاژهای انباشت شده در تغییر خواص ساختاری و مغناطیسی بس لایه‌ها در این پژوهش به این سوال پاسخ داده می‌شود که تاثیر ضخامت لایه‌های نازک و افزوده شدن آهن به ساختار بس لایه‌ای برخواص بس لایه‌ها چگونه است.

کارهای آزمایشگاهی

بس لایه‌های Co-Cu/Cu توسط یک الکترولیت شامل یون‌های Co^{2+} و Cu^{2+} انباشت داده می‌شوند. همچنین الکترولیت مورد استفاده جهت الکتروانباشت بس لایه‌های Co-Cu/Cu شامل یون‌های Fe^{2+} ، Co^{2+} و Cu^{2+} است. برای تأمین یون‌های لازم برای الکتروانباشت بس لایه‌های Co-Cu/Cu یک الکترولیت با ترکیب ۰/۴ مولار سولفات کبالت و ۰/۰۵ مولار سولفات مس در آب دی‌یونیزه تهیه گردید، همچنین در بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu بجز مواد فوق ۰/۴ مولار سولفات آهن نیز به محلول الکترولیت اضافه شد. علاوه بر یون‌های فلزی فوق ۵۰ میلی مول اسید بوریک به عنوان ماده افزودنی به هردو الکترولیت اضافه گردید. ماده افزودنی باعث تنظیم و بهینه شدن شرایط الکتروانباشت از جمله یکنواخت شدن سطح لایه‌ها می‌شود [۱۰-۱۲].

برای الکتروانباشت بس لایه‌ها از مد پتانسیل ثابت استفاده گردید. یک زیرلایه شیشه/کرم (۵ نانومتر)/ طلا (۲۵ نانومتر) که به روش کندوپاش تهیه گردیده بود برای لایه نشانی مورد استفاده قرار گرفت. یک سیم طلا جهت برقراری اتصال به زیر لایه متصل شد. محدوده لایه نشانی با چسباندن یک نوار کاپتون که بر روی آن دایره‌ای به شعاع ۰/۴ سانتی‌متر (مساحت ۰/۵ سانتی‌متر مربع) وجود داشت بر روی زیر لایه مشخص گردید.

تصاویر مربوط به بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu با سه ضخامت مختلف از لایه مغناطیسی و غیر مغناطیسی در شکل ۳ الف-ج نمایش داده شده‌است. نمودار ناهمواری‌های سطحی برحسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی برای این سه نمونه نیز در شکل ۴ ترسیم شده‌است. نمودارها نشان می‌دهند در بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu نیز مانند بس لایه‌های Co-Cu/Cu با کاهش ضخامت هر یک از لایه‌ها مغناطیسی یا غیرمغناطیسی اندازه ناهمواری‌های سطحی اشباع و طول متقاطع و مولفه هارست کاهش می‌یابد.

مقادیر مربوط به ناهمواری‌های سطحی اشباع، طول متقاطع و مولفه هارست برای بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu در جدول ۲ بیان گردیده‌است. نوع ناهمواری‌های سطحی برای این بس لایه‌ها نیز از نوع نابهنجار است. علاوه بر این مشاهده می‌شود در لایه‌های با ضخامت مشابه از بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu ، میزان ناهمواری‌های سطحی برای بس لایه‌های Co-Cu/Cu بیشتر است.

این نتایج با نتایج به‌دست آمده از سیستم Ni-Cu/Cu و Fe-Ni-Cu/Cu نیز همخوانی دارد [۱۳].

ساختار بلوری بس لایه‌ها توسط پراش اشعه ایکس بررسی گردید. نقش پراش اشعه ایکس برای بس لایه‌های $\text{Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)}$ و $\text{Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)}$ در شکل ۵ نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو بس لایه‌ای Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu دارای جهت‌گیری ترجیحی (۱۱۱) هستند که از زیرلایه تبعیت می‌کند. تمام پیک‌های مربوط به کبالت در نقش پراش اشعه ایکس مربوط به ساختار مکعبی بوده بجز پیک (۱۰۰) که مربوط به ساختار هگزاگونال است. نقش پراش اشعه ایکس بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu نیز مانند لایه‌های Co-Cu/Cu است با یک پیک اضافه که مربوط به ساختار هگزاگونال آهن است. همچنین بدلیل تنش وارد بر شبکه در بس لایه‌های

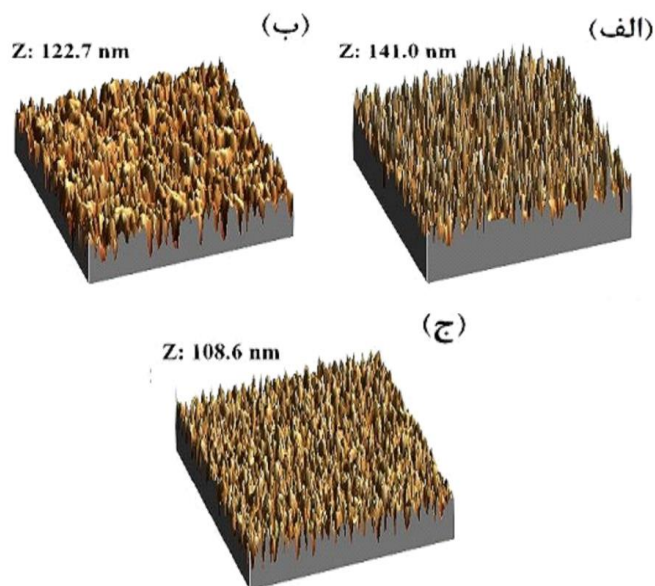
محاسبه گردید. برای این کار سطح نمونه را به تمام قطعات مربعی ممکن با ابعاد $\frac{2}{256}$ ابعاد کل طول اسکن تقسیم می‌کنیم و برای هر یک از این قطعات میزان ناهمواری‌های سطحی را حساب کرده و از آن‌ها میانگین گرفته می‌شود. پس از این برای طول‌های با ابعاد $\frac{3}{256}$ ابعاد کل طول اسکن و به‌همین ترتیب تا ابعاد قطعه برابر کل ابعاد کل طول اسکن شود. سپس با رسم میزان ناهمواری‌های سطحی بر حسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی و با برازش دادن یک منحنی بر روی آن توسط نرم‌افزار Roughness می‌توان پارامترهایی مانند ناهمواری اشباع، طول همبستگی و مولفه هارست را بدست آورد. همچنین با بررسی مولفه ناهمواری‌های منطقه‌ای می‌توان مشخص نمود ناهمواری‌های سطحی برای لایه‌ها بهنجار یا نابهنجار هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

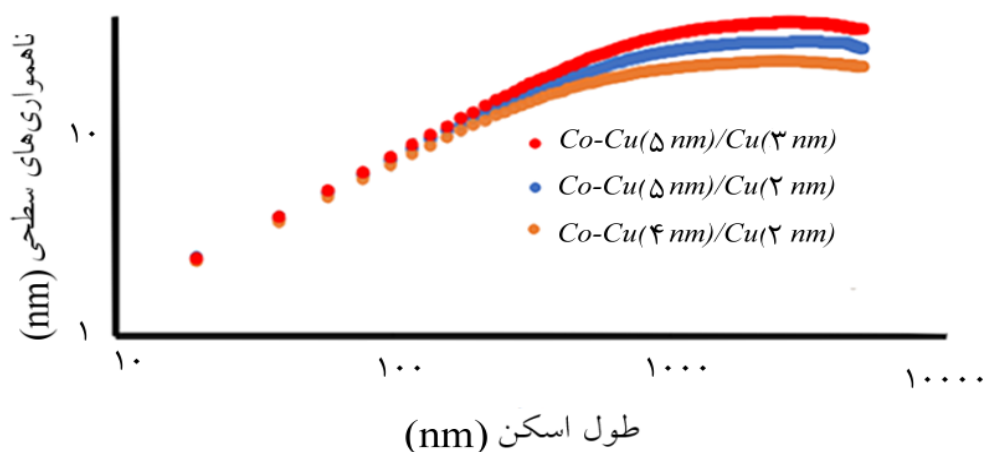
ناهمواری‌های سطحی بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر مربوط به بس لایه‌های Co-Cu/Cu با ضخامت‌های مختلف از لایه مغناطیسی و غیر مغناطیسی در شکل ۱ الف-ج نمایش داده شده‌است. همچنین می‌توان نمودار ناهمواری‌های سطحی برحسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی را برای این نمونه‌ها در شکل ۲ رسم مشاهده نمود. همانطور که در نمودارها دیده می‌شود با کاهش ضخامت هر یک از لایه‌ها مغناطیسی یا غیرمغناطیسی اندازه ناهمواری‌های سطحی اشباع و طول متقاطع و مولفه هارست کاهش می‌یابد. مقادیر مربوط به ناهمواری‌های سطحی اشباع، طول متقاطع و مولفه هارست برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۱ بیان گردیده‌است. همچنین از نمودارها مشاهده می‌گردد که نوع ناهمواری‌های سطحی از نوع نابهنجار است.

به‌دست آمده برای ضخامت‌های مختلف بس لایه‌ای Co-Cu و Cu/Cu به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نمایش داده شده‌است.

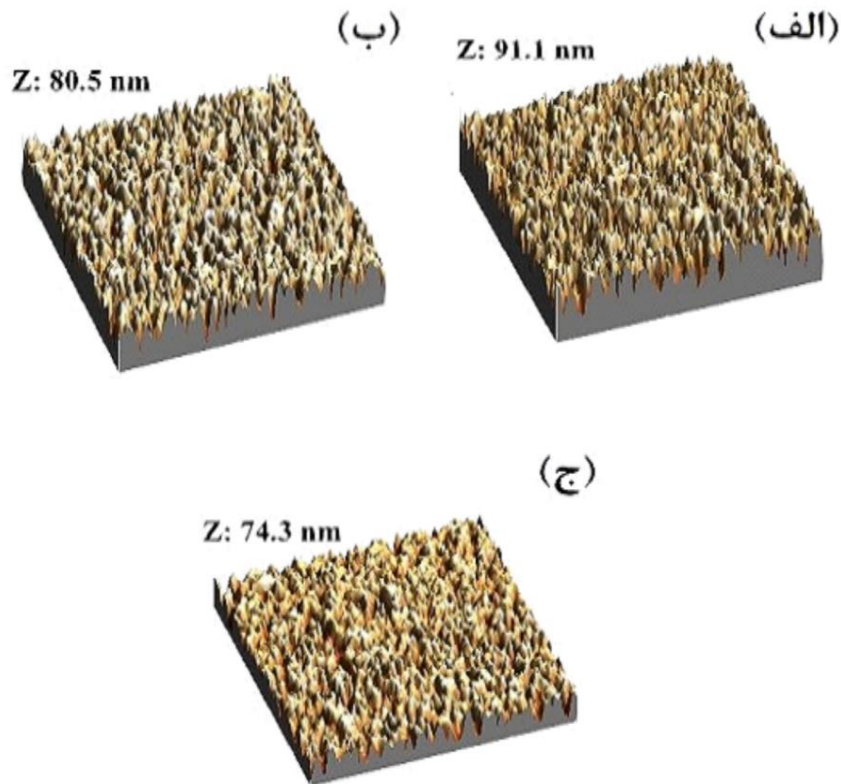
Fe-Co-Cu/Cu پیک‌ها نسبت به بس لایه‌های Co-Cu کمی جابجایی به سمت چپ را دارا می‌باشند. آنالیز تفکیک انرژی اشعه ایکس نشان می‌دهد که با تغییر ضخامت لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی درصد ترکیب عناصر موجود در بس لایه‌ها تغییر می‌کند. نتایج



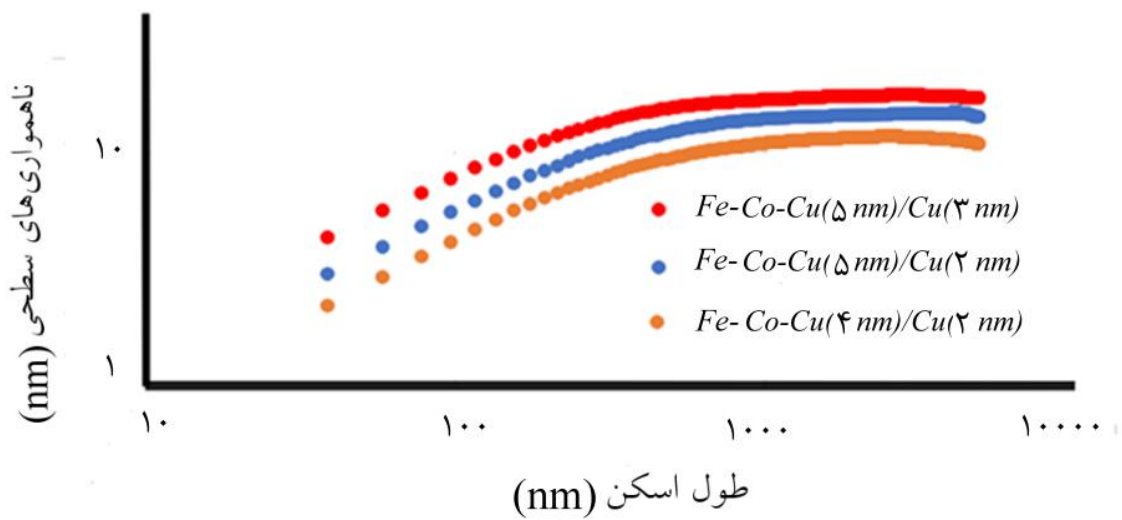
شکل ۸. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی برای بس لایه‌های (الف) $\text{Co-Cu}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(3 \text{ nm})$ ، (ب) $\text{Co-Cu}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})$ و (ج) $\text{Co-Cu}(4 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})$.



شکل ۲. نمودار ناهمواری‌های سطحی برحسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی برای بس لایه‌های Co-Cu/Cu با ضخامت‌های مختلف لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی برای بس لایه‌های الف) $\text{Fe-Co-Cu}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(3 \text{ nm})$ ، ب) $\text{Fe-Co-Cu}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})$ و ج) $\text{Fe-Co-Cu}(4 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})$.



شکل ۴. نمودار ناهمواری‌های سطحی برحسب طول اسکن در مقیاس لگاریتمی برای بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu با ضخامت‌های مختلف لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی.

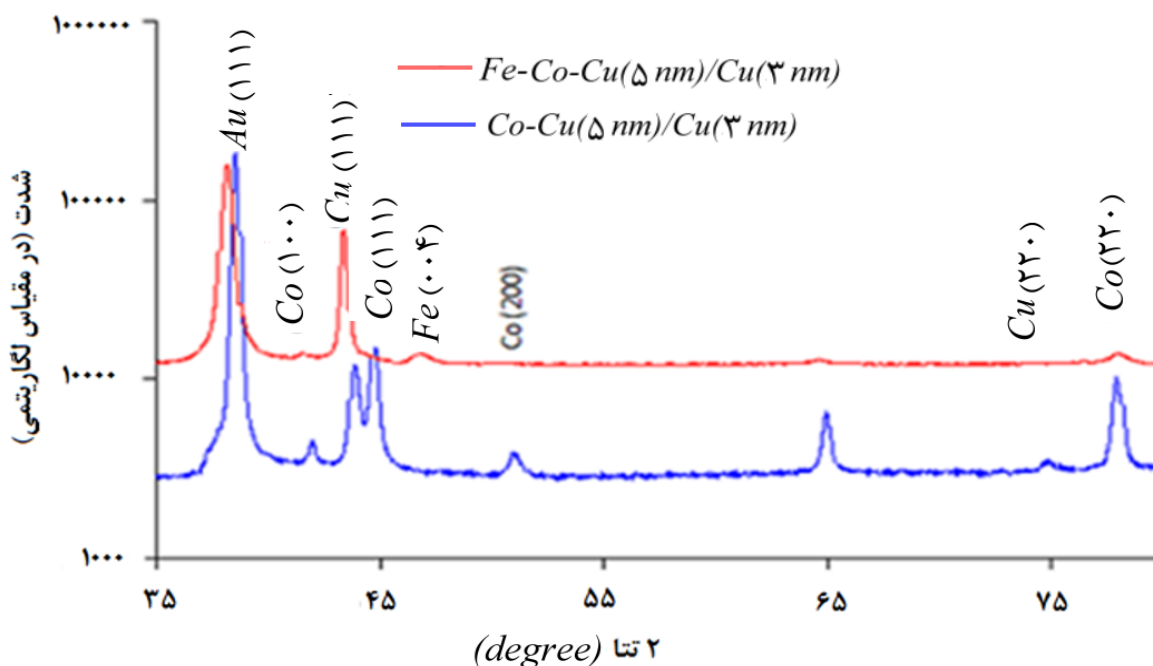
نبیونی و همکاران، مشخصه‌یابی و مطالعه ناهمواری سطحی بس لایه‌های Co-Cu/Cu، علوم و مهندسی سطح ۳۰(۱۳۹۵) ۸۱

جدول ۱. مقادیر مربوط به ناهمواری‌های سطحی اشباع، طول متقاطع و مولفه هارست برای بس لایه‌های Co-Cu/Cu با ضخامت‌های مختلف.

ضخامت بس لایه‌ها	ناهمواری‌های سطحی اشباع (nm)	طول متقاطع (nm)	مولفه هارست
Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)	۳۵/۶۹	۹۸۹	۰/۹۵
Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)	۲۹/۱۶	۸۵۹	۰/۸۹
Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)	۲۳/۴۳	۷۸۱	۰/۸۴

جدول ۲. مقادیر مربوط به ناهمواری‌های سطحی اشباع، طول متقاطع و مولفه هارست برای بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu با ضخامت‌های مختلف.

ضخامت بس لایه‌ها	ناهمواری‌های سطحی اشباع (nm)	طول متقاطع (nm)	مولفه هارست
Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)	۱۷/۸۵	۷۰۳	۰/۷۸
Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)	۱۴/۴۴	۶۴۲	۰/۷۴
Fe-Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)	۱۰/۷۴	۵۷۹	۰/۶۹



شکل ۵. نقش پراش اشعه ایکس برای بس لایه‌های Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm) و Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm).

افزایش درصد مس موجود در بس لایه‌های الکتروانباشت شده Co-Cu/Cu می‌شود. همچنین برای ضخامت‌های مشابه از لایه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی از بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu در صد مس موجود در بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu بیشتر است.

نتایج بدست آمده از آنالیز تفکیک انرژی اشعه ایکس نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی در هر دو بس لایه‌های Co-Cu/Cu و Fe-Co-Cu/Cu در صد کبالت به صورت نابهنجار افزایش می‌یابد. انحلال کبالت در حین انباشت لایه مس باعث کاهش درصد کبالت و

جدول ۳. درصد ترکیب عناصر موجود در بس لایه‌ها برای ضخامت‌های مختلف بس لایه‌های Co-Cu/Cu.

ضخامت لایه‌ها	درصد وزنی کبالت	درصد وزنی مس
Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)	۸۳/۹۶	۱۶/۰۴
Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)	۸۸/۷۱	۱۱/۲۹
Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)	۸۶/۰۸	۱۳/۹۲

جدول ۴. درصد ترکیب عناصر موجود در بس لایه‌ها برای ضخامت‌های مختلف بس لایه‌های Fe-Co-Cu/Cu.

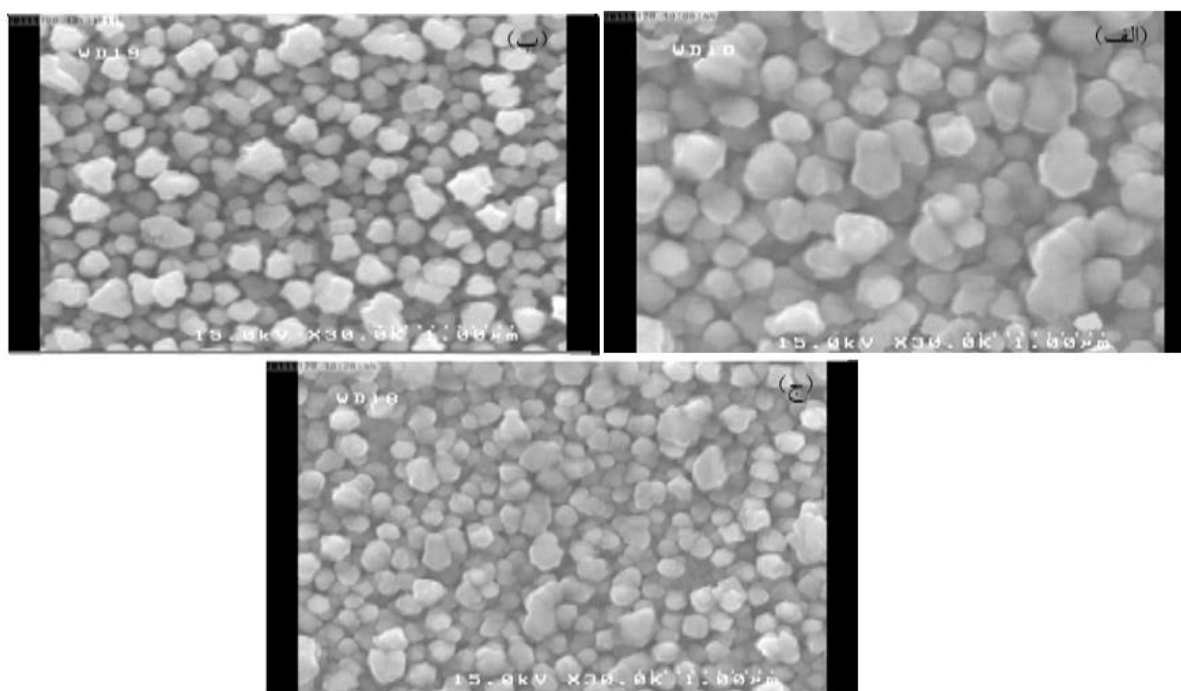
ضخامت لایه‌ها	درصد وزنی آهن	درصد وزنی کبالت	درصد وزنی مس
Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)	۲۶/۸۶	۵۱/۲۶	۲۱/۸۸
Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)	۲۹/۰۴	۵۳/۹۴	۱۷/۰۲
Fe-Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)	۲۷/۹۱	۵۳/۵۰	۱۸/۵۹

خواص مغناطیسی بس لایه‌های الکتروانباشت شده توسط مغناطومتر نیروی گرادیان متناوب بررسی گردید. برای بررسی تاثیر افزوده شدن آهن به بس لایه‌ها منحنی پسماند دو نمونه (Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm) و Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm) مورد بررسی قرار گرفت.

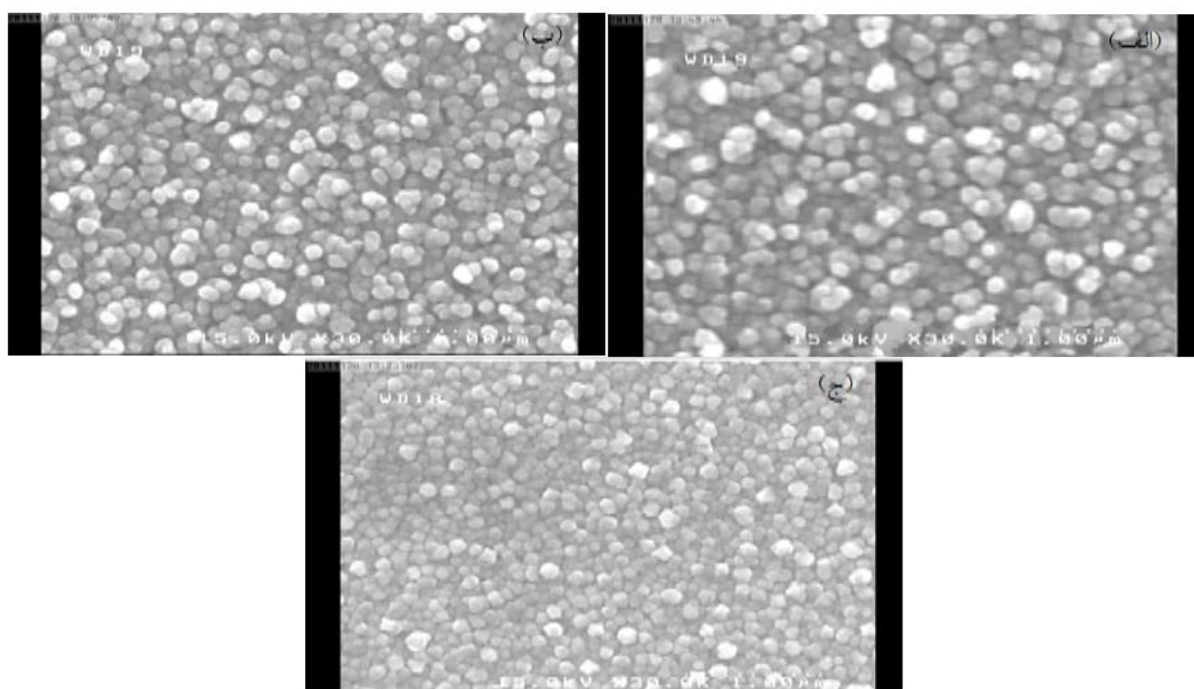
منحنی پسماند این دو نمونه در حالت موازی با صفحه در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن آهن به بس لایه‌ای باعث کاهش کورسیویتی و افزایش مغناطش پسماند می‌شود نسبت به حالت بدون آهن می‌شود. در نتیجه با افزودن آهن به بس لایه‌ای بس لایه‌ای از نظر مغناطیسی نرم‌تر می‌شود.

مورفولوژی هریک از نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. برای بررسی اثر تغییر ضخامت هر یک از لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بس لایه‌های Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)، Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm) و Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm) به ترتیب در شکل ۶ (الف-ج) و برای بس لایه‌های لایه‌های Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm) و Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm) و Fe-Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm) به ترتیب در شکل ۷ (الف-ج) نمایش داده شده است.

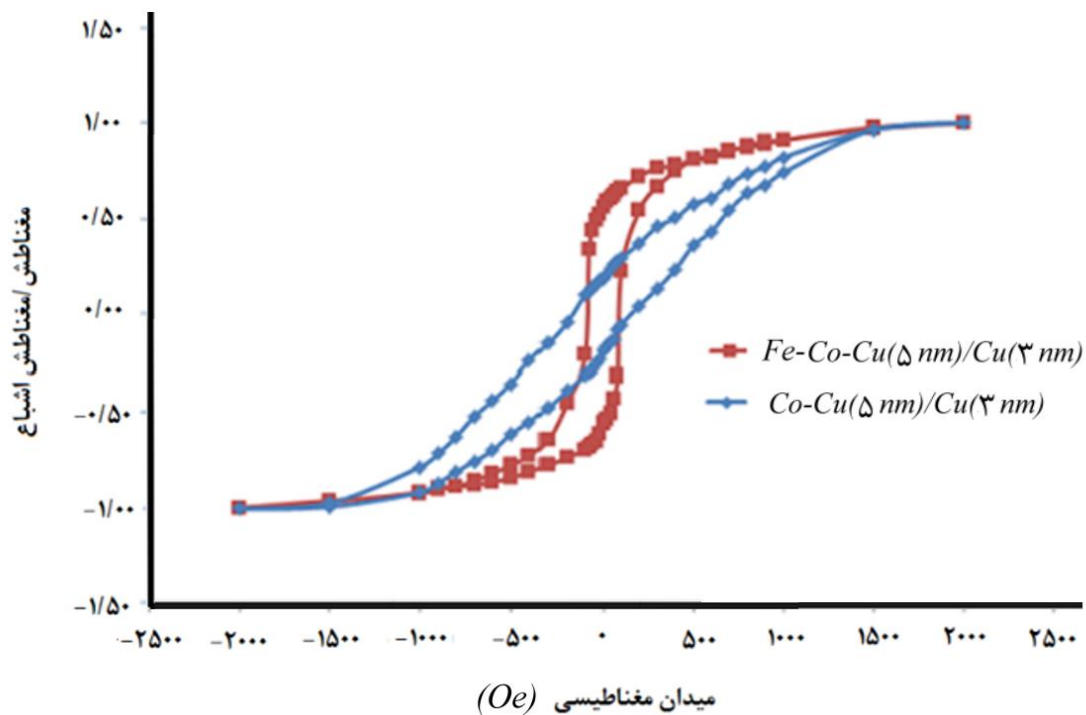
تصاویر نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت در لایه مغناطیسی یا غیر مغناطیسی در هر دو نوع بس لایه اندازه دانه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این در ضخامت‌های مشابه افزودن آهن به لایه‌ها باعث افزایش اندازه دانه‌ها می‌شود.



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بس لایه‌های الف) $\text{Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)}$ ، ب) $\text{Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)}$ و ج) $\text{Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)}$



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بس لایه‌های الف) $\text{Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(3 nm)}$ ، ب) $\text{Fe-Co-Cu(5 nm)/Cu(2 nm)}$ و ج) $\text{Fe-Co-Cu(4 nm)/Cu(2 nm)}$



شکل ۸. منحنی پسماند بس لایه‌های آهن-کبالت-مس (۵ نانومتر)/مس (۳ نانومتر) و کبالت-مس (۵ نانومتر)/مس (۳ نانومتر) در حالت موازی با صفحه.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بس لایه‌های مغناطیسی-غیرمغناطیسی کبالت-مس به روش الکتروانباشت سنتز گردید و اثر تغییر ضخامت هر یک از لایه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی و همچنین تاثیر افزودن آهن به لایه مغناطیسی بررسی گردید.

تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهند با کاهش ضخامت هر یک از لایه‌ها مغناطیسی یا غیرمغناطیسی در بس لایه‌ها اندازه ناهمواری‌های سطحی اشباع و طول متقاطع و مولفه هارست کاهش می‌یابد. همچنین نوع ناهمواری‌های سطحی از نوع نابهنجار است. علاوه بر این برای ضخامت‌های مشابه از لایه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی با افزودن آهن به لایه مغناطیسی در صد مس موجود در بس لایه‌های شامل آهن بیشتر می‌گردد.

نقش پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد بس لایه‌های دارای جهت‌گیری ترجیحی (۱۱۱) بوده و تمام پیک‌های

مربوط به کبالت بجز پیک (۱۰۰) مربوط به ساختار مکعبی اس.ت همچنین در بس لایه‌های شامل آهن پیک مربوط به ساختار هگزاگونال آهن مشاهده گردید. همچنین با افزودن آهن به بس لایه‌های پیک‌ها کمی جابجایی به سمت چپ داشتند.

آنالیز تفکیک اشعه ایکس نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی در صد کبالت به صورت نابهنجار افزایش می‌یابد. همچنین برای ضخامت‌های مشابه افزودن آهن باعث افزایش در صد مس موجود در بس می‌گردد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت در لایه مغناطیسی یا غیر مغناطیسی اندازه دانه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این در ضخامت‌های مشابه افزودن آهن به لایه‌ها باعث افزایش اندازه دانه‌ها می‌شود.

9. G. Nabiyouni, B. Jalali Farahani, *Anomalous scaling in surface roughness evaluation of electrodeposited nanocrystalline Pt thin films*, Applied Surface Science, 256 (2009) 674-682.
10. K. Hedayati, G. Nabiyouni, *Surface roughness analysis and magnetic property studies of nickel thin films electrodeposited onto rotating disc electrodes*, Appl Phys A 116 (2014) 1605-1612.
11. G. Nabiyouni, W. Schwarzacher, *Growth, characterization and magnetoresistive study of electrodeposited Ni/Cu and Co-Ni/Cu multilayers*, Journal of Crystal Growth, 275 (2005) e1259-e1262.
12. W. Schwarzacher, *Kinetic roughening of electrodeposited films*, J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004) R859-R880.
13. K. Hedayati, *Structural and magnetic characterization of electrodeposited Ni-Cu/Cu and Fe-Ni-Cu/Cu multilayer*, Applied Physics A 118 (2015) 975-979.

بنابراین می‌توان به طور کل نتیجه گرفت که افزایش ضخامت هر یک از لایه‌ها باعث افزایش ناهمواری‌های سطحی و افزودن آهن باعث نرم‌تر شدن خواص مغناطیسی بس لایه‌ها می‌گردد که سوال اصلی در این مقاله بوده است.

مراجع

1. P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, H. Sowers, *Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers*, Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.
2. J. Noetzel, U. K. Rossler, A. Tselev, F. Prokert, D. Eckert, K. H. Muller, E. Wieser, W. Moller, *Preparation of granular Co/Cu by ion-beam mixing of laser-deposited multilayers*, Applied Physics A. 71 (2000) 105-107.
3. H. An, S. Takada, T. Sannomiya, S. Muraishi, J. Shi, Y. Nakamura, *Effect of substrate temperature on the magnetic properties and internal stresses of CoPt/AlN multilayer deposited by dc magnetron sputtering*, Applied Physics A. 113 (2013) 31-35.
4. I. Bakonyi, L. Peter, *ectrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance: progress and problems*, Progress in Materials Science. 55 (2010) 107-245.
5. W. Schwarzacher, M. Alper, R. Hart, G. Nabiyouni, I. Bakonyi, E. Toth-Kadar, *Electrodeposited Magnetic Multilayers*, MRS Proceedings 451 (1996) 347-357.
6. M. Jafari Fesharaki, L. Peter, T. Schucknecht, D. Rafaja, J. Degi, L. Pogany, K. Neurohr, E. Szeles, G. Nabiyouni, I. Bakonyi, *Magnetoresistance and Structural Study of Electrodeposited Ni-Cu/Cu Multilayers*, Journal of the Electrochemical Society. 159 (2012) D162-D171.
7. F. Family, T. Vicsek, *Dynamics of fractal surfaces*, World Sci-entific, Singapore, (1991).
8. M. F. Alamini, R. C. da Silva, V. C. Zoldan, E. A. Isoppo, U. P. Rodrigues Filho, F. D. A. Aarao Reis, A. N. Klein, A. A. Pasa, *Norma versus anomalous roughening in electrodeposited Prussian Blue layers*, Electrochemistry Communications 13 (2011) 1455-1458.