

## مطالعه‌ی ناهمسانگردی مغناطیسی در ابرشبکه‌های Ni-Fe /Cu

نرگس صفائی، غلامرضا نبیونی\* و نرگس نوازش  
گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه اراک

### چکیده

روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی یا الکتروانباشت یکی از ساده‌ترین و مفیدترین روش‌ها در تهیه‌ی فیلم‌های نازک آلایژی و به خصوص چندلایه‌ای‌های فلزی می‌باشد. در این کار، از الکترولیتی شامل نمک‌های سولفات نیکل، آهن و مس در شرایط متفاوتی از دما و pH استفاده شد و ابرشبکه‌های NiFe/Cu به روش الکتروانباشت بر زیرلایه‌های Cu، Ti و Au لایه‌نشانی شدند. برای بررسی ساختار و پارامترهای شبکه‌ی بلوری فیلم‌های نازک چندلایه‌ای، از آنالیز XRD استفاده گردید. قله‌های اقماری که نشان‌دهنده‌ی ساختار متناوب لایه‌ها هستند، در فیلم‌های چندلایه‌ای جداشده از زیرلایه‌ی تیتانیوم مشاهده گردید. اثر ضخامت لایه‌های غیرمغناطیسی مس بر خواص مغناطیسی فیلم‌ها و ریخت سطحی آن‌ها با استفاده از مغناطومتر نیروی متناوب (AGFM) و میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM)، مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش ضخامت لایه‌های میانی مس پسماند افزایش و ساختار سطحی بلورک‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد. در نهایت با استفاده از یک دستگاه پروب چهارنقطه‌ای مغناطومقاومت نمونه‌ها اندازه‌گیری و اثر مغناطومقاومت ناهمسانگرد (AMR) به بزرگی حداکثر ۲/۵٪ در آن‌ها مشاهده گردید، نشانه‌ای از وجود جفت‌شدگی پادفرومغناطیسی بین لایه‌های مغناطیسی مجاور مشاهده نمی‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** الکتروانباشت، ابرشبکه‌های NiFe/Cu، پسماند، AMR

### مقدمه

در آن میدان و جریان موازی هستند مغناطومقاومت طولی<sup>۳</sup> یا LMR و اگر میدان و جریان بر هم عمود باشند مغناطومقاومت عرضی<sup>۴</sup> یا TMR می‌نامند. بنابراین در پدیده‌ی مغناطومقاومت ناهمسانگرد  $LMR > 0$  و  $TMR < 0$  است. بزرگی مغناطومقاومت ناهمسانگرد از تفاضل مؤلفه‌های طولی و عرضی مغناطومقاومت حاصل می‌شود [۱-۲]. اثر AMR از نظر کاربرد در صنایع مختلف مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این اثر به ویژه در دیسک‌های حافظه و حسگرهای مغناطیسی کاربرد دارد. یکی از موادی که در این زمینه کاربرد فراوانی دارد، آلایژی از نیکل-آهن به نام پرمالوی است. پرمالوی یک

تغییر مقاومت یک رسانا هنگامی که در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد را مغناطومقاومت<sup>۱</sup> یا MR می‌نامند. حدود ۱۶۰ سال پیش لرد کلونین مقاومت آهن و نیکل را در حضور میدان مغناطیسی اندازه‌گیری و در آن‌ها نوعی ناهمسانگردی مغناطیسی مشاهده کرد و آن را مغناطومقاومت ناهمسانگرد<sup>۲</sup> (AMR) نامید. بدین معنی که اگر میدان و جریان عبوری از فلزات فوق موازی باشند مقاومت افزایش و اگر میدان مغناطیسی در جهت عمود بر جریان اعمال گردد مقاومت کاهش می‌یابد. آرایشی را که

\* نویسنده‌ی مسئول (g-nabiyouni@araku.ac.ir)

3- Longitudinal Magnetoresistance (LMR)  
4- Transverse Magnetoresistance (TMR)

1- Magnetoresistance (MR)  
2- Anisotropic Magnetoresistance (AMR)

pH) به محلول اضافه می‌شود. ترکیبات الکترولیت و غلظت اجزای آن در جدول بیان شده است. اسید بوریک افزوده شده باعث تسریع حرکت حباب‌های هیدروژن از سطح کاتد و در نتیجه مانع از تخلخل فلز رسوب داده شده می‌شود. به منظور آن که رسوبات حاصل به صورت دانه‌های ریز، براق و مسطح باشند و هم‌چنین از شاخه‌دار شدن رسوبات ممانعت به عمل آید، از مواد افزودنی چون ساخارین در فرآیند رسوب‌دهی استفاده می‌گردد. ساخارین یا شکر مصنوعی معمولاً به عنوان درخشان کننده و جلا دهنده در الکترولیت‌های رسوب فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به علت آن که مانع از پخش سطحی اتم‌ها به خارج از مرکز رشد می‌شود به هسته‌سازی کمک می‌کند [۱۵-۱۶]. تمامی مواد به‌کاررفته در این تحقیق از شرکت Merck تهیه شدند.

جدول ۱- ترکیبات به‌کاررفته در الکتروانباشت

چندلایه‌ای‌های NiFe/Cu

NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	۰/۰۵M
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	۰/۰۱M
CuSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	۰/۰۰۵M
Saccharin	۰/۰۱M
H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub>	۰/۰۵M
Deionized Water	۲۵۰cc

حمام الکتروشیمیایی توسط سه الکتروود است که به دستگاه پای‌پتانسیل (ساخت شرکت BHP - مدل 2061C) متصل است. الکتروود کار همان زیرلایه‌های مسی، تیتانیومی و طلا هستند که با فرآیند ماسک‌زنی و الکتروپولیش آماده می‌گردند. زیرلایه‌های مسی از لحاظ آن که ثابت شبکه‌ای بسیار نزدیک به پرمالوی دارد منجر به تشکیل لایه‌های یکنواخت و گسترده‌ای می‌گردد. زیرلایه‌ی تیتانیومی نیز به علت جدا شدن لایه‌ها از سطح آن و امکان انتقال لایه‌ها بر سطوح دلخواه به طور گسترده‌ای در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکتروود ثانویه یا آند یک ورقه‌ی مشبک پلاتینی با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر مربع و الکتروود

اصطلاح برای آلیاژ مغناطیسی از نیکل و آهن (شامل ۸۰ درصد نیکل و ۲۰ درصد آهن) می‌باشد که به دلیل پذیرفتاری بالا، وادارندگی و مغناطوتنگش نزدیک به صفر در رده‌ی مواد مغناطیسی فوق نرم قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی آن بسته به جهت و قدرت میدان مغناطیسی حد اکثر تا ۴٪ تغییر می‌کند. ساختار آن fcc و ثابت شبکه‌ی آن ۰/۳۵۵ نانومتر است و در حسگرهای AMR به صورت لایه‌های متناوب با لایه‌های غیر مغناطیسی به کار می‌رود [۳-۹]. در ابتدا ابر شبکه‌ها و چندلایه‌ای‌های مغناطیسی با خاصیت AMR توسط روش‌های فیزیکی مبتنی بر خلأ تهیه می‌شد ولی در سال ۱۹۲۱ بلوم و همکارانش برای اولین بار چندلایه‌های فلزی را به روش الکتروانباشت تهیه نمودند و از آن زمان این روش یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای تولید چندلایه‌ای‌ها محسوب می‌شود [۱].

در این کار ابتدا با استفاده از یک دستگاه پای‌پتانسیل از الکترولیتی که شامل نمک‌های سولفاتی است استفاده شده و با بهینه نمودن ولتاژ انباشت و pH محلول، ابرشبکه‌های Permalloy (Ni<sub>80</sub> Fe<sub>20</sub>)/Cu به روش الکتروانباشت بر زیر لایه‌های مس، تیتانیوم و طلا رشد داده شدند [۱۰-۱۴]. به منظور بررسی ساختار شبکه‌ای، و متناوب بودن چندلایه‌ای‌ها از پراش پرتو ایکس، XRD، استفاده شد. همچنین اثر ضخامت لایه‌های غیرمغناطیسی مس بر ریخت سطحی و خواص مغناطیسی فیلم‌های ابرشبکه‌ای به ترتیب با آنالیزهای SEM و AGFM مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت برای مطالعه‌ی اثر مغناطومقاومت ناهمسانگرد در ابرشبکه‌های NiFe/Cu، از یک دستگاه چهار نقطه‌ای با آرایش مربعی و اعمال میدان مغناطیسی استفاده گردید.

## روش انجام آزمایش

الکترولیت به کار رفته در این کار شامل نمک‌های سولفات نیکل، آهن و مس است. ساخارین به عنوان ماده افزودنی (درخشان کننده) و اسید بوریک (برای تثبیت

$H^+$  با علامت منفی، انتظار می‌رود که در pH های بالاتر غلظت یون‌های  $H^+$  کاهش یافته و غلظت  $(OH)^-$  در الکترولیت افزایش یابد. وجود  $(OH)^-$  سبب هیدروکسید شدن کاتیون‌های فلزی موجود در الکترولیت می‌شود. بنابراین به منظور کاهش هیدروکسید شدن و افزایش رسانندگی به ولتاژ بیش‌تری نیاز است. تأثیر pH و غلظت الکترولیت و همچنین ولتاژ انباشت در ساختار و خواص مغناطیسی لایه‌های نیکل توسط نصیرپوری و همکاران به تفصیل مطالعه شده است [۱۷].

پس از الکتروانباشت چندلایه‌ای‌ها، به منظور بررسی ساختار بلوری و پارامترهای شبکه، ریخت سطحی، اندازه‌گیری مغناطش، وادارندگی مغناطیسی و اثر مغناطومقاومت ابرشبه‌ها به ترتیب از آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD ساخت کمپانی Philips با آند مسی و طول موج ۱/۵۴ آنگستروم)، میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM ساخت کشور هلند کمپانی فیلیپس - مدل XL30)، مغناطومتر نیروی گرادیان نیروی متناوب (AGFM) و مقاومت‌سنج که در این‌جا یک پروب چهارنقطه‌ای<sup>۱</sup> است استفاده شد.

## نتایج

ولتامتری چرخه‌ای یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده برای به‌دست آوردن اطلاعات کیفی مرتبط با واکنش‌های الکتروشیمی به‌کار می‌رود. این روش یک مکان‌یابی سریعی از پتانسیل‌های اکسایش-کاهش انواع الکترولیت‌ها را ارائه می‌دهد. ولتامتری انواع مختلفی دارد که در این کار از نوع دوره‌ای آن استفاده شده است [۱۸-۲۰].

ولتامتری حاصل از حمامی شامل نمک‌های سولفات نیکل، آهن و مس با  $pH=3$  در شکل ۱- الف آورده شده است. دو پیک کاتدی مربوط به شروع انباشت مس و آلیاژ نیکل - آهن در این شکل دیده می‌شود. در قسمت ب شکل، اثر دما بر پتانسیل‌های شروع انباشت مس و نیکل -

مرجع از نوع کالومل اشباع می‌باشد. در این کار از مد کروئوکولومتری (CHC) این دستگاه استفاده شده است. پارامترهای انباشت شامل بار، زمان و ولتاژهای بهینه لایه نشانی به دستگاه پتانسیواستات که توسط یک رایانه کنترل می‌شود اعمال و منحنی‌های بار- زمان، جریان- زمان و ولتاژ- جریان برای لایه‌های انباشت شده به دست می‌آید. در این روش با تغییر تناوبی ولتاژ بین مقادیر مناسب، فلز مورد نظر انباشت می‌شود. در یک پتانسیل مثبت تر فلز نجیب‌تر یعنی فلزی که تمایل بیش‌تری به جذب الکترون یا احیا شدن دارد (مس) بر روی الکتروود کار انباشت می‌شود و لایه‌ی غیرمغناطیسی مس تشکیل می‌شود و در یک ولتاژ منفی‌تر، فلز فعال‌تر که تمایل کم‌تری به جذب الکترون دارد (آلیاژ نیکل - آهن) رسوب کرده و لایه‌ی مغناطیسی تشکیل می‌شود.

در ادامه‌ی کار با بهینه نمودن pH (افزودن اسید سولفوریک برای افزایش و سود به منظور کاهش آن) و ولتاژ و همچنین کار در دمای محیط، شرایط مورد نیاز برای رشد ابرشبه‌ها فراهم شد. نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- شرایط انباشت چندلایه‌ای‌های NiFe/Cu

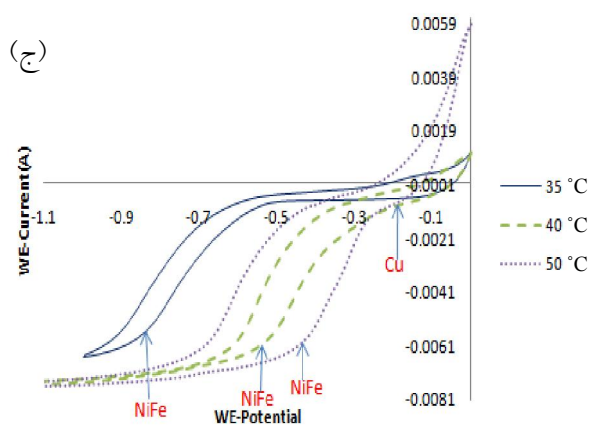
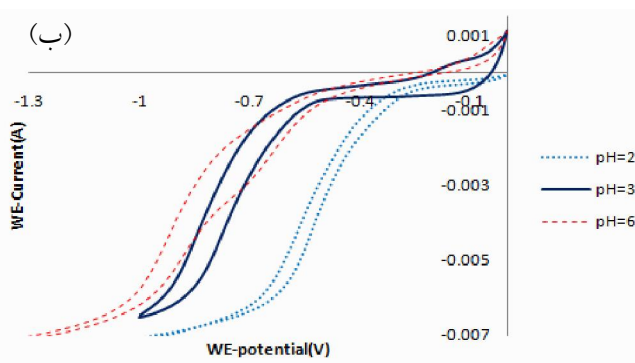
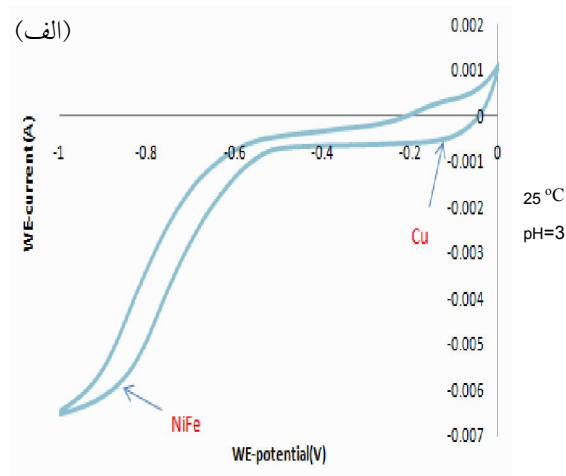
ولتاژ انباشت NiFe	۲/۵- ولت
ولتاژ انباشت Cu	۰/۴- ولت
pH	۳
دما (برحسب سانتی‌گراد)	۲۵-۳۰
الکتروود آند	ورقه‌ی پلاتینی
الکتروود کاتد	زیرلایه‌های Au and Cu, Ti
الکتروود مرجع	کالومل اشباع

رشد لایه‌ها با ثابت نگه داشتن pH در گستره‌ی وسیعی از ولتاژها برای مس و آلیاژ نیکل - آهن صورت می‌گیرد. اما بهترین چندلایه‌ای‌ها از نظر کیفیت و درخشندگی ظاهری در ولتاژهای ۰/۴- ولت و ۲/۵- ولت به ترتیب برای مس و آلیاژ نیکل - آهن به دست آمده است. pH یک الکترولیت مساوی است با لگاریتم غلظت یون‌های

درجه‌ی سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شده است. مشاهده می‌شود که افزایش pH تأثیر چندانی بر ولتاژ شروع انباشت مس ندارد اما با افزایش آن از مقدار ۲ به ۶، پتانسیل آغازین رسوب‌دهی آلیاژ نیکل- آهن از مقدار ۰/۵۵- به مقدار ۰/۹- ولت می‌رسد.

آهن مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می‌گردد که با افزایش دما از ۳۵ تا ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ولتاژ آغازین مس تغییر چندانی نداشته اما ولتاژهای آغازین آلیاژ نیکل- آهن مثبت‌تر گردیده است.

در شکل ۱- ج اثر pH بر مکان قله‌های کاندی مورد بررسی قرار گرفته است و در این حالت دما در مقدار ۳۰



شکل ۱- منحنی جریان- ولتاژ برای الکترولیتی شامل یون‌های  $\text{Ni}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Cu}^{2+}$  برای الف- دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و pH=3، ب- در pH های متفاوت، ج- در چند دمای مختلف.

چندبلوری صورت می‌گیرد، این قله‌های اقماری، به صورت دو قله در اطراف قله‌های ارجح بلوری ظاهر می‌شوند [۱]. در این کار از زیرلایه‌های بس‌بلوری Cu، Au و Ti استفاده شده است (شکل ۲- الف تا ۲- ج). همان‌طور که در شکل‌های ۲- الف و ۲- ب مشاهده می‌شود، شدت قله‌های زیرلایه و قله‌های مربوط به چندلایه‌ای‌های NiFe/Cu آنقدر قوی است که قله‌های اقماری قابل مشاهده نیست. اما با حذف اثر زیرلایه، یعنی با انباشت چندلایه‌ای بر زیرلایه‌ی تیتانیومی و جداکردن لایه‌ی حاصله از سطح Ti، قله‌های اقماری کوچکی در شکل ۲- ج قابل مشاهده هستند.

بر اساس موقعیت قله‌های اقماری می‌توان ضخامت دولایه‌ای‌ها را محاسبه نمود. قانون براگ برای پراش پرتو ایکس از صفحات بلوری به صورت زیر است:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (1)$$

در این رابطه  $n$  عدد صحیح،  $\lambda$  طول موج باریکه‌ی فرودی،  $d$  فاصله‌ی میان صفحات اتمی در بلور و  $\theta$  زاویه‌ی میان باریکه‌ی فرودی و صفحات بلوری است که به آن زاویه‌ی براگ گفته می‌شود. در مورد چندلایه‌ای‌ها  $d$  را به عنوان ضخامت دولایه‌ای‌ها در نظر می‌گیریم. بنابراین اگر موقعیت قله‌ی ارجح در  $2\theta_i$  باشد، داریم:

$$n\lambda = 2d \sin\theta_i \quad (2)$$

و موقعیت قله‌های اقماری اطراف آن در  $2\theta_{i-1}$  و  $2\theta_{i+1}$  باشد

$$(n+1)\lambda = 2d \sin\theta_{i+1} \quad (3)$$

و

$$(n-1)\lambda = 2d \sin\theta_{i-1} \quad (4)$$

از تقاضل دو رابطه (۳) و (۴) ضخامت دولایه‌ای‌ها ( $d$ ) به دست می‌آید [۱]:

$$d = \lambda / (\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_{i-1}) \quad (5)$$

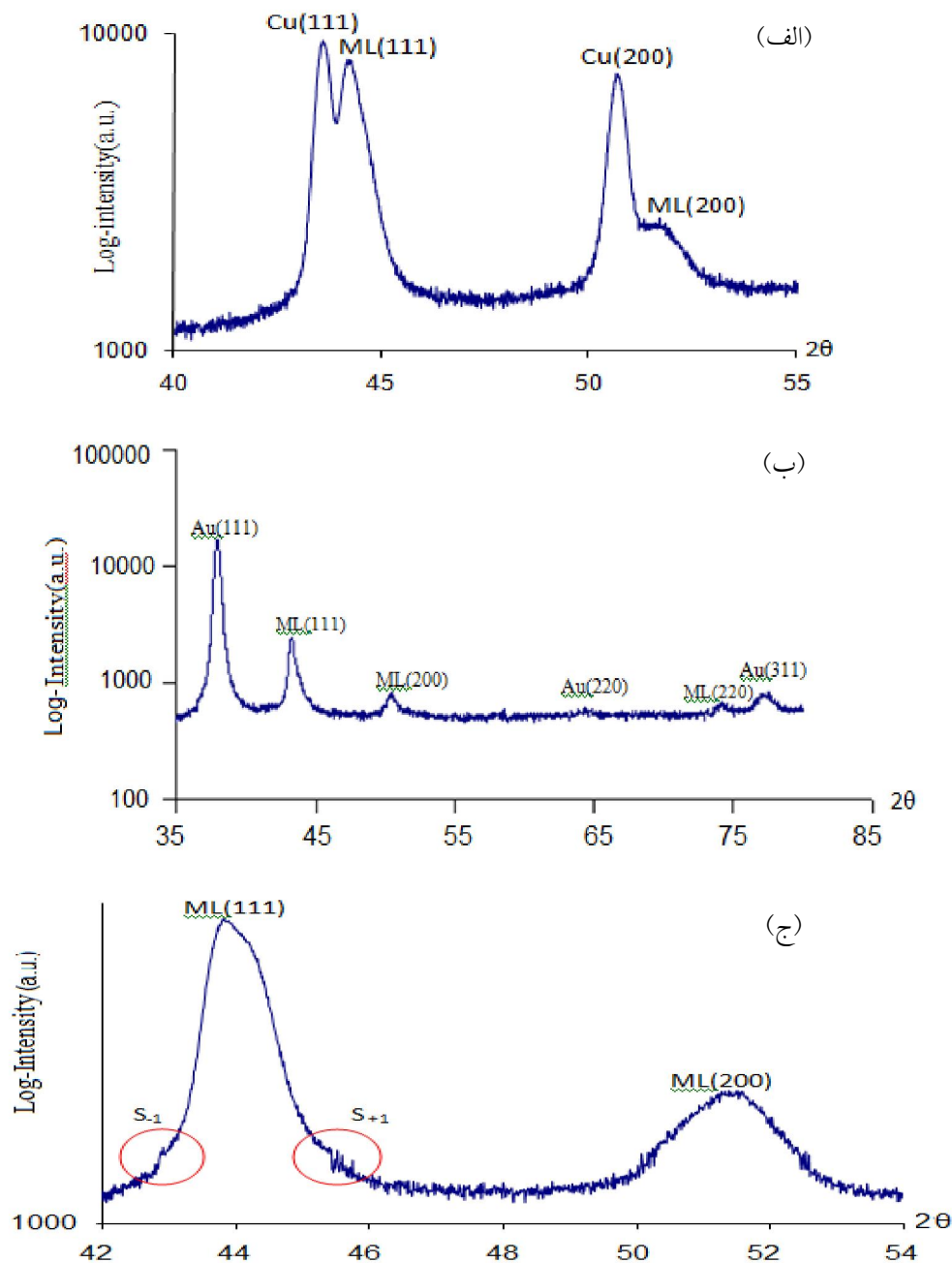
قله‌ی ارجح در شکل ۳- ج قله‌ی (۱۱۱) می‌باشد که قله‌های اقماری  $S_{+1}$  و  $S_{-1}$  در اطراف آن و به ترتیب در

همان‌طور که در شکل ۱- الف مشاهده می‌گردد، دو قله‌ی کاندی که معرف شروع انباشت مس و آلیاژ نیکل- آهن است به ترتیب در ولتاژهای ۰/۲- و ۰/۸- ولت دیده می‌شود و این به آن معنا است که در ولتاژهای بالاتر از ۰/۸- ولت باید شاهد هم‌انباشتی مس با آلیاژ نیکل- آهن بود. با قرار دادن ولتاژ بهینه‌ی ۰/۴- ولت برای مس و افزایش ولتاژهای منفی برای انباشت آلیاژ نیکل- آهن تا ۲/۵- ولت، ما شاهد کاهش هم‌انباشتی مس با نیکل- آهن (حداقل در ظاهر لایه‌های انباشتی و خواص آهن‌ربایی لایه‌ها) شدیم. هم‌انباشتی کبالت و روتینیوم توسط جعفری و همکاران به تفصیل مطالعه شده است [۲۱].

در شکل ۱- ب مشاهده می‌گردد که با افزایش دما ولتاژ شروع انباشت به‌خصوص برای آلیاژ نیکل- آهن کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به این صورت توجیه کرد که افزایش دما منجر به کاهش مقاومت الکترولیت و افزایش انحلال املاح فلزی می‌شود و در نتیجه‌ی آن سبب افزایش بهره‌ی جریان می‌گردد. با توجه به آن که غلظت نمک‌های سولفاتی نیکل و آهن نسبت به نمک سولفاتی مس بسیار بیش‌تر است، افزایش دما تأثیر بیش‌تری بر تولید یون‌های نیکل و آهن در الکترولیت نسبت به تولید یون‌های مس دارد.

به منظور بررسی ساختار بلوری و یافتن پارامترهای شبکه از آنالیز XRD استفاده گردید [۲۲]. مس و آلیاژ پرمالوی هر دو دارای ساختار مکعبی مرکز سطحی یا fcc می‌باشند و بس لایه‌ای آن‌ها نیز دارای همین ساختار است.

یکی از مشخصات دوره‌ای بودن چندلایه‌ای‌های NiFe/Cu وجود قله‌های اقماری در اطراف قله‌های اصلی در طیف XRD است. تعداد این قله‌ها بستگی به عوامل متعددی از جمله زیر لایه دارد. در صورتی که فیلم‌ها ساختار تناوبی کاملی داشته باشند (لایه‌نشانی روی زیرلایه‌ی تک بلور به این امر کمک می‌کند)، تعداد این قله‌ها معمولاً خیلی بیش‌تر از دو قله است. ولی در اکثر لایه‌نشانی‌های الکتروانباشت که معمولاً روی زیرلایه‌های



شکل ۲- طرح پرتو ایکس از ابرشبکه‌های  $[\text{NiFe}(4\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})]_{n=800}$  بر زیرلایه‌های الف-Cu، ب-Au و ج- جدا شده از Ti.

این اختلاف این است که قسمتی از بار مبادله شده بین کاتد و آند صرف تولید هیدروژن می‌شود، در نتیجه بازدهی جریان کم‌تر از یک است.

از عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های ابرشبکه‌ها، به‌خصوص خواص مغناطیسی آن‌ها، ضخامت لایه‌های غیرمغناطیسی می‌باشد. در این کار، با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه‌های

موقعیت  $2\theta_{i-1}=42/80$  و  $2\theta_{i+1}=45/50$  قرار دارند و مقدار  $d=0/54 \text{ nm}$  می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (۵) مقدار  $d$  به‌دست می‌آید:

$$d = \lambda / (\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_{i-1}) = 6/56 \text{ nm} \quad (6)$$

این مقدار ضخامت دولایه‌ای‌ها از مقدار اسمی آن که در مورد این نمونه برابر با  $8 \text{ nm}$  است کوچک‌تر است. علت

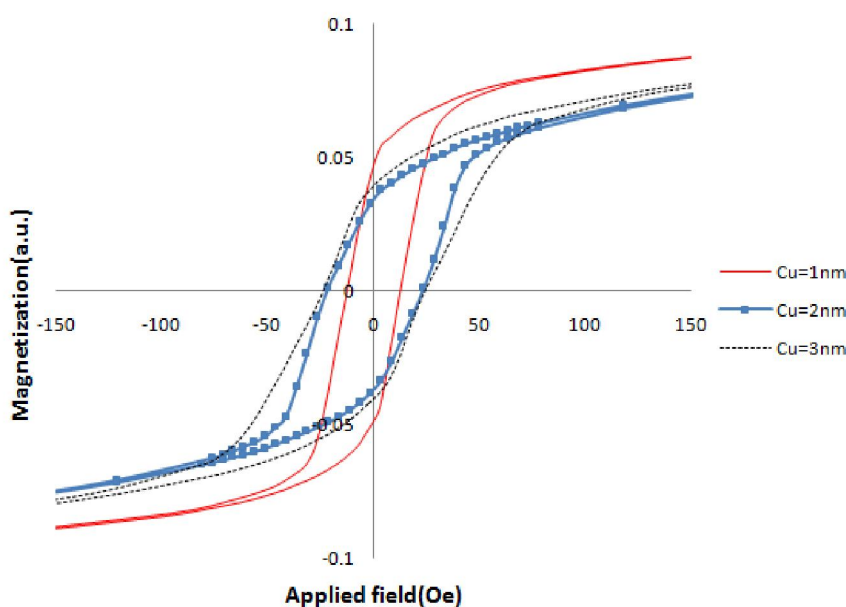
بسیار باریکی دارد. اما زمانی که لایه‌های نانومتری این آلیاژ با لایه‌های نانومتری ماده‌ی غیرمغناطیسی چون مس به صورت بس‌لایه در کنار هم قرار می‌گیرند، مس به صورت یک ناخالصی عمل نموده و باعث افزایش واداندگی می‌شود.

نتایج حاصل از شکل ۳ و مقادیر آورده شده در جدول ۳، بیان‌گر آن است که با افزایش ضخامت لایه‌ی میانی مس واداندگی افزایش داشته اما مغناطش پسماند و اشباع تغییر چندانی نداشته‌اند.

تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی نیز بیان‌گر کوچک شدن و یکنواختی نانوذرات در اثر افزایش ضخامت لایه‌ی میانی مس می‌باشد.

آلیاژی پرمالوی در ۴ نانومتر و تغییر ضخامت لایه‌ی میانی مس از ۱ تا ۳ نانومتر، اثر این ضخامت بر واداندگی مغناطیسی، مغناطش اشباع و مغناطش پسماند چندلایه‌ای‌های  $[NiFe(4nm)/Cu(t)]_{n=800}$  مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳).

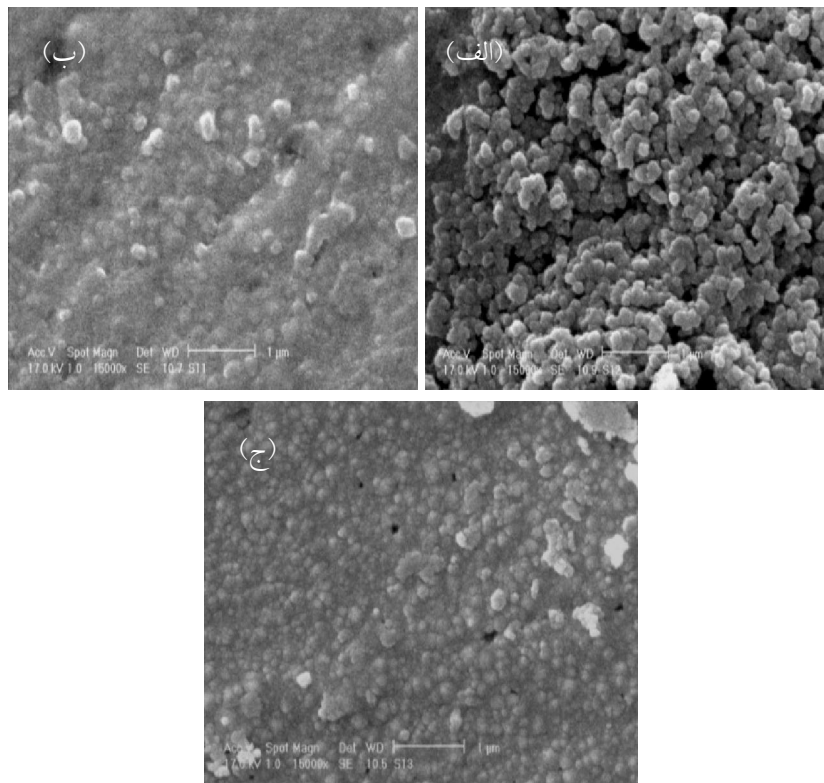
یکی از مشخصات مواد فرومغناطیس حلقه‌ی پسماند آن‌ها می‌باشد. مواد فرومغناطیس به دو دسته‌ی نرم و سخت تقسیم می‌شوند. آن دسته از این مواد که واداندگی مغناطیسی کم‌تر از ۲۵ اورستد دارند مغناطیس نرم و آن دسته که واداندگی آن‌ها بیش‌تر از ۲۵ اورستد است، جزء مواد مغناطیسی سخت محسوب می‌شوند. آلیاژ نیکل- آهن به‌خصوص پرمالوی دارای واداندگی بسیار پایین است و یک ماده‌ی مغناطیسی نرم است. و منحنی پسماند



شکل ۳- منحنی پسماند برای چندلایه‌ای‌های  $[NiFe(4nm)/Cu(t)]_{n=800}$  با مقادیر  $t=1,2,3$  نانومتر.

جدول ۳- ویژگی‌های مغناطیسی آلیاژ مولتی لایه NiFe/Cu برای سه ضخامت لایه میانی مس

مغناطش اشباع (a.u.)	مغناطش پسماند (a.u.)	واداندگی مغناطیسی (Oe) $H_c$	ضخامت لایه‌ی آلیاژ NiFe (nm)	ضخامت لایه میانی مس (nm)
۰/۰۷۶	۰/۴۶۹	۱۲/۳	۴	۱
۰/۰۵۷	۰/۰۳۴	۲۲/۰۸	۴	۲
۰/۰۵۲	۰/۰۳۱	۲۴/۱۷	۴	۳



شکل ۴- تصاویر SEM برای ضخامت ۴ نانومتری آلیاژ نیکل- آهن و ضخامت لایه‌های میانی مس الف- ۱، ب- ۲ و ج- ۳ نانومتر.

### بررسی مغناطومقاومت ناهمسانگرد

مفهوم و نام‌گذاری "مغناطومقاومت" از اندازه‌گیری مقاومت مواد مختلف در حضور میدان مغناطیسی خارجی ناشی می‌شود:  $\Delta R = R_H - R_O$ ، که در  $R_H$  مقاومت مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی و  $R_O$  مقاومت مغناطیسی در غیاب میدان است. نسبت این تغییر مقاومت به  $R_O$  را مغناطومقاومت می‌نامند:

$$MR = \frac{\Delta R}{R_O} = \frac{R_H - R_O}{R_O} \quad (۷)$$

اگر میدان مغناطیسی خارجی موازی جهت جریان عبوری از فیلم نازک قرار داده شود مقدار مغناطومقاومت حاصله با حالتی که میدان و جریان در جهت عمود بر هم باشند متفاوت است.

در موادی که به لحاظ مغناطیسی ناهمسانگرد هستند پدیده‌ی مغناطومقاومت ناهمسانگرد مشاهده می‌شود. در

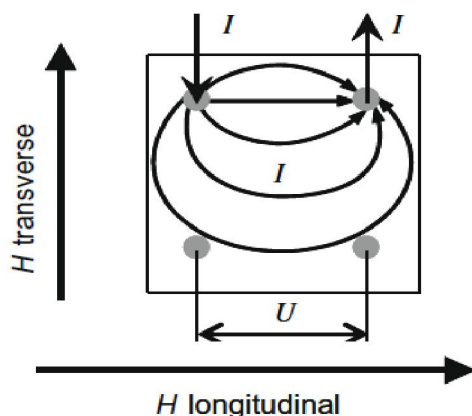
حالتی که جهت میدان و جریان موازی است، افزایش شدت میدان مغناطیسی منجر به افزایش مقدار MR می‌گردد. که در این صورت آن را LMR یا مغناطومقاومت طولی می‌نامند و  $LMR > 0$ . زمانی که جهت میدان و جریان عمود بر هم باشد، افزایش شدت میدان منجر به کاهش مقدار MR می‌گردد و در این حالت به آن TMR یا مغناطومقاومت عرضی می‌گویند و  $TMR < 0$ . تفاوت بین این دو مقدار، مغناطومقاومت ناهمسانگرد یا AMR نامیده می‌شود که این ویژگی از جفت‌شدگی اسپین-مدار الکترون‌ها سرچشمه می‌گیرد:

$$AMR = LMR - TMR \quad (۸)$$

اثر AMR بر این حقیقت استوار است که تعدادی از مواد فرومغناطیسی دارای یک وابستگی مقاومت الکتریکی‌شان به زاویه‌ی میان جهت جریان و جهت میدان مغناطیسی (یا جهت مغناطش‌شان) هستند. توصیف میکروسکوپیکی این



در این کار به منظور اندازه‌گیری اثر MR و مشاهده‌ی اثر مغناطومقاومت ناهمسانگرد AMR، از یک دستگاه چهار نقطه‌ای با هندسه‌ی مربعی استفاده شده است. این آرایش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- اندازه‌گیری مغناطومقاومت در دو حالت جریان- میدان موازی و جریان- میدان عمود [۱].

در این کار به منظور مشاهده و اندازه‌گیری اثر AMR در فیلم‌های چندلایه‌ای، مقاومت الکتریکی تعدادی از آن‌ها در حضور میدان مغناطیسی در دو حالت طولی و عرضی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در شرایط الکتروشیمیایی متفاوت رشد داده شده بودند. بیشینه‌ی مقدار AMR به میزان ۲/۵ درصد در یک فیلم متشکل از ۸۰۰ لایه از Ni-Fe(4nm)/Cu(2nm) مشاهده گردید. منحنی نمایش تغییرات مقاومت الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی برای این فیلم در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مغناطومقاومت طولی به میزان ۱/۱ درصد افزایش و مغناطومقاومت عرضی به میزان ۱/۴ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین برای این نمونه مقدار AMR به صورت زیر به دست می‌آید:

$$AMR = LMR - TMR = 1.1 - (-1.4) = 2.5\% \quad (9)$$

اثر بیان می‌کند که این وابستگی مقاومت الکتریکی به زاویه‌ی میان جریان و مغناطش به پراکندگی ناشی از برهم کنش اسپین- مدار الکترون‌هایی که در جهت مغناطش حرکت می‌کنند، بستگی دارد. اگر جریان الکتریکی در جهت امتداد مغناطش باشد، مقاومت الکتریکی بیشینه و زمانی که امتداد جریان در جهت عمود بر جهت مغناطش باشد، مقاومت کمینه می‌گردد. اگر ماده‌ی مغناطیسی با این ویژگی‌ها به صورت یک فیلم نازک رسوب داده شود، می‌توان تنها یک محور آسان مغناطش را در صفحه فیلم در نظر گرفت که ماده به‌طور خود به خودی در آن جهت مغناطیده می‌گردد.

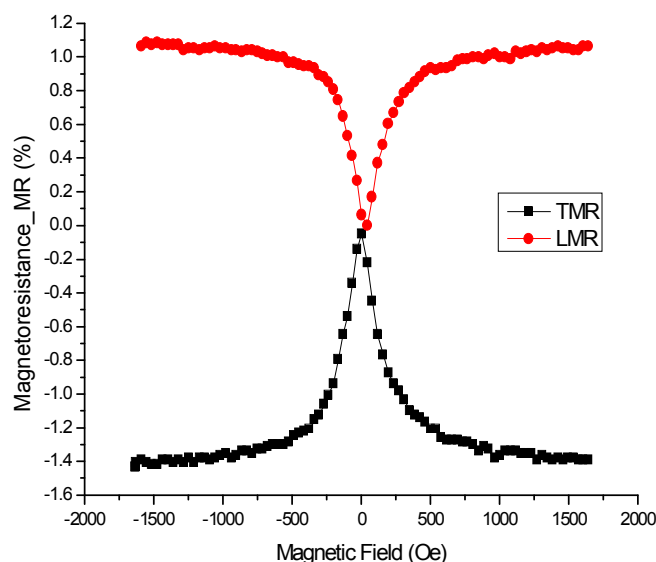
به‌کارگیری یک میدان مغناطیسی خارجی با مقدار معین H در جهت عمود بر محور آسان، چرخش بردار مغناطش M را به اندازه‌ی زاویه‌ی  $\theta$  حول موقعیت اولیه‌اش در پی دارد و در نتیجه موجب کاهش مقاومت می‌گردد. چنین ساختاری می‌تواند به عنوان حسگر میدان مغناطیسی خارجی استفاده شود.

ارتباط میان مقاومت  $\rho$  و زاویه‌ی  $\theta$  با فرمول Voight-Thomson بیان می‌گردد:

$$\rho(\theta) = \rho_t + \Delta\rho \cos^2\theta \quad (9)$$

که در این رابطه  $\rho_t$  مقاومت ویژه در جهت عمود بر محور آسان و  $\Delta\rho$  تفاوت مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در دو حالت عمود و موازی با محور آسان است.

اثر AMR در ساختارهای مغناطیسی مانند فیلم‌های نازک و چندلایه‌ای‌ها مشاهده می‌شود. با اندازه‌گیری‌های دقیق اثر AMR می‌توان آن را به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بررسی رفتار سوئیچیک مغناطش در ساختارهای مغناطیسی نانومقیاس و میکرومقیاس به کار برد. این اثر به‌طور گسترده‌ای در حسگرهای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین، حسگرهای زاویه خطی و مکان خطی و هم‌چنین در مواردی مانند طراحی فن‌آوری‌های میکروساختار قابل انعطاف و با حساسیت بالا به کار می‌رود [۲۳-۲۹].



شکل ۶- منحنی MR بر حسب میدان مغناطیسی کاربردی در ساختار  $[\text{NiFe}(4\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})]_{n=800}$

جفت‌شدگی پادفرمغناطیسی گشتاورهای مغناطیسی لایه‌های مغناطیسی مجاور تأیید نمی‌گردد.

### منابع

- [1] Bakonyi, I.; Peter, L.; “Electrodeposited multilayer films with giant magneto-resistance (GMR): Progress and Problems”, *Progress in Material Science* 55 (2010) 107-245.
- [2] Jiang, Y.; Zhang, W.; “[ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}$ ] spin-valve multilayers, Electrodeposited on Ni Fe buffer layers”, *Thin Solid Films* 516 (2008) 3210-3216.
- [3] Sohn, H.J.; Doo, S.K.; Kang, T.; “Mathematical modeling of electrodeposition of permalloy thin film”, *Metals and Materials* 5 (1999) 451-457.
- [4] Li, X.P.; Seet, H.L.; Fan, J.; Yi, J.B.; “Electrodeposition and characteristics of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$  composite wires”, *Journal of*

### نتیجه‌گیری

در این کار ابتدا با ولتاژتری چرخه‌ای از الکترولیتی شامل نمک‌های سولفات نیکل، آهن و مس مشاهده گردید که دما و pH دو فاکتور مؤثر در مکان قله‌های کاتدی و ولتاژ شروع انباشت لایه‌های مس و آلیاژ نیکل-آهن می‌باشند. در طرح XRD ابرشبکه‌ها نیز، حضور زیرلایه در مشاهده قله‌های اقماری مؤثر دیده شد و با حذف زیرلایه این قله‌ها به صورت قله‌های بسیار کوچکی اطراف قله‌ی ارجح که همان قله‌ی (۱۱۱) می‌باشد، مشاهده شده‌اند. همچنین تغییر ضخامت لایه‌های غیر مغناطیسی مس بر ودارندگی مغناطیسی و ریخت سطحی لایه‌ها اثر گذار بوده و با افزایش آن، وادارندگی افزایش و بلورک‌های سطحی یکنواخت‌تر می‌گردند. به منظور مشاهده‌ی اثر میدان بر مغناطومقاومت چندلایه‌ای‌ها، مقادیر MR برای دو حالت میدان-جریان موازی و میدان-جریان عمود اندازه‌گیری گردید که نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها منجر به مشاهده‌ی اثر AMR با مقدار ۲/۵٪ گردید. با توجه به عدم مشاهده‌ی اثر مغناطومقاومت بزرگ (GMR) در فیلم‌های چندلایه‌ای Ni-Fe/Cu وجود

- [14] Bard, A.J.; Faulkner, L.R.; "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications", John Wiley, (2001).
- [15] Brankovic, S.R.; Haislmaier, R.; Vasilievic, N.; "Physical incorporation of saccharin molecules into electrodeposited soft high magnetic moment CoFe alloys", *Electrochemical and Solid- State Letters* 10 (2007) 67-71.
- [16] Mockute, D.; Bernotiene, G.; Vilkaite, R.; "Reaction mechanism of some benzene sulfonamide and saccharin derivatives during nickel electrodeposition in watts-type electrolyte", *Surface and Coating Technology* 160 (2002) 152-157.
- [17] Nasirpour, F., Bending, S.J.; Peter, L.M. and Fangohr, H.; "Electrodeposition and magnetic properties of three-dimensional bulk and shell nickel mesostructures", *Thin Solid Films* 519 (2011) 8320-8325.
- [۱۸] کامپتون، ر؛ جالز، اچ؛ مترجم: پیمان، ج؛ "پتانسیل‌های الکترودی"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۷۹.
- [۱۹] مفیدی، ج؛ "الکتروشیمی صنعتی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۸.
- [۲۰] خان‌محمدی، م؛ "شیمی تجزیه دستگامی"، انتشارات دانشگاه بین‌المللی امام‌خامنه‌ی قزوین، قزوین، ۱۳۸۶.
- [21] Jafari Fesharaki, M.; Nabyouni, G.; Dégi, J.; Pogány, L.; Révész, A.; Bakonyi, I.; Péter, L.; "Anomalous codeposition of cobalt and ruthenium from chloride-sulfate bath", *Journal of Solid State Electrochemistry* 16 (2012) 715-722.
- [22] Cullity, B.D.; "Elements of X-Ray Diffraction", Addison Wesley, (1976).
- Magnetism and Magnetic Materials* 304 (2006) 11-116.
- [5] Sam, S.; Fortas, G.; Guittoum, A.; Gabouz, N.; "Electrodeposition of NiFe films on Si(100) substrate", *Surface Science* 601 (2007) 4270-4273.
- [6] Li, H.; Ebrahimi, F.; "Synthesis and characterization of electrodeposited nanocrystalline nickel-iron alloys", *Material Science and Engineering* 347 (2003) 93-101.
- [7] Su, C.W.; He, F.J.; Ju, H.; Zhang, Y.B.; Wang, E.L.; "Electrodeposition of Ni, Fe and NiFe alloys on 316 stainless steel surface in a fluoroborate bath", *Electrochimica Acta* 54 (2009) 6257-6263.
- [8] Seet, H.L.; Li, X.P.; Hong, M.H.; Lee, K.S.; The, K.H.; Teo, H.H.; "Electrodeposition of NiFe micro-pillars using laser drilled templates", *Journal of Materials Processing Technology* 192 (2007) 346-349.
- [9] Andricacos, P.C.; Arana, C.; Tabib, J.; Dukovic, J.; Romankiw, L.T.; "Electrodeposition of nickel-iron alloy", *Electrochem* 136 (1989) 1336-1340.
- [10] Djokic, S.; "Electrodeposition, Theory and Practice", Springer, (2010).
- [11] Kanani, N.; "Electrodeplating Basic Principles, Processes and Practices", Elsevier, (2004).
- [12] Brenner, A.; "Electrodeposition of Alloys", Academic Press, (1963).
- [13] Safranek, W.H.; "The Properties of Electrodeposited of Metals and Alloys", American Electroplaters and Surface Finishers Society, (1986).

- [27] Dubois, S.; Matchal, C.; “Perpendicular giant magnetoresistance of Ni Fe/Cu and Co/Cu multilayers nanowires”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 165 (1997) 30-36.
- [28] Kok, K.Y.; Hangarter, C.M.; Goldsmith, B.; Myung, N.V.; “Synthesis and characterization of electrodeposited permalloy (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)/Cu multilayered nanowires”, *Progress in Material Science* 322 (2010) 3876-3881.
- [29] Attenborough, K.; Hart, R.; Lane, S.J.; Alper M.; Schwarzacher, W.; “Magnetoresistance in electrodeposited NiFeCu/Cu multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 148 (1995) 335-336.
- [23] Tokarz, A.; Fraczek, T.; “Structure, hardness and thermal stability of electrodeposited Cu/Ni nanostructured multilayers”, *Progress in Material Science* 15 (2007) 247-252.
- [24] Huang, Q.; Young, D.P.; Podlaha, E.J.; “Magnetoresistance of electrodeposited FeCoNiCu/Cu multilayers”, *Journal of Applied Physics* 94 (2003) 1864-1867.
- [25] Peter, L.; Katona, G.L.; Betenyi, Z.; “Electrodeposition of Ni-Co-Cu/Cu multilayers”, *Electrochimica Acta* 53 (2005) 837-845.
- [26] Leistner, K.; Fahler, S.; Schlorb, H.; Schultz, L.; “Preparation and characterization of electrodeposition Fe/Pt multilayers”, *Electrochemistry Communications* 8 (2006) 916-920.