

سبحان الله



دانشگاه شاهرود

دانشکده فیزیک

گرایش حالت جامد

عنوان

سنتز و مطالعه خواص فیزیکی ساختارهای چند لایه‌ای

فرومغناطیس / پاد فرومغناطیس / فرو مغناطیس

دانشجو: ثریا افروز

اساتید راهنما:

دکتر محمد ابراهیم قاضی

دکتر مرتضی ایزدی فرد

پایان نامه کارشناسی ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۳

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که، هستی مان بخشد و به طریق علم و دانش، رهنمونان شد و به، هم نشینی
رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

تقدیم به روح پدر بزرگوارم و پاس بی کران برهدلی و همراهی و بمکامی مادر دلسوز و مهربانم که سجده‌ی ایثارش کل

محبت راد و وجودم پروراند و دلمان گهربارش بقطه‌های مهربانی را به من آموخت.

تقدیم به همسرم به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش

و آسایش برای من فراهم آورده است.

تقدیم به خواهر و خواهرزاده ام، همراهان، همیشگی و پشتوانه‌های زندگیم.

و باز هم سپاس پروردگارم را
که افتخار شکردی استادانی را نصیبم نمود که در کتبشان نه تنها علم، که اخلاق را آموختم؛
استاد محمد ابراهیم قاضی و استاد مرتضی ایزدی فرد
از همه زحمات بی دریغشان سپاسگزارم.

و

از همراهی و همدلی؛
هم کلاسی ها، مسئولین محترم دانشکده و آزمایشگاه بویره جناب مهندس عسکری
خانواده، اساتید، دوستانم، و...
صمیمانه تشکر می نمایم.

چکیده:

هدف این پایان نامه، رشد و مشخصه یابی خواص مغناطیسی نانوساختارهای سه لایه‌ای Co/Cu/Co می‌باشد. از میان روش‌های متعدد رشد چندلایه‌ای‌ها، لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی در خلأ انتخاب شد. به منظور بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی سه لایه‌ای‌ها، لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف مس و کبالت تهیه شدند.

برای مطالعه ساختار از طیف پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده و ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) انجام شد. همچنین بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها با دستگاه مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) و مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها به روش ون در پائو اندازه‌گیری شد. در نهایت برای محاسبه ناهمسانگردی مغناطیسی از قانون نزدیکی به اشباع استفاده شد.

در طیف پراش اشعه ایکس مربوط به این نمونه‌ها قله پراش (۱۱۱) ساختار مکعبی مرکز وجهی کبالت مشاهده شد. تصاویر FESEM نمونه‌ها نشان داد که در نمونه‌های با ضخامت لایه مس ثابت، با افزایش ضخامت لایه کبالت ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها تغییر چندانی نمی‌کند و تمام نمونه‌ها دارای سطحی با دانه‌بندی یکنواخت متراکم و منسجم هستند. در سطح نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت، با افزایش ضخامت لایه غیر مغناطیسی مس ابتدا ابعاد دانه‌ها افزایش، سپس با افزایش بیشتر ضخامت لایه مس ابعاد دانه‌ها کاهش پیدا کرد. نتایج اندازه‌گیری پسماند مغناطیسی لایه‌ها بیانگر این است که محور آسان نمونه‌ها در صفحه لایه قرار دارد. همچنین افزایش ضخامت لایه مغناطیسی کبالت افزایش مغناطیس اشباع و باقیمانده را به همراه داشت. در حالیکه، با افزایش ضخامت لایه جداساز مس، این مقادیر تغییر چندانی نمی‌کند. اندازه‌گیری‌های مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی کبالت مقادیر مقاومت مغناطیسی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه میانی و غیر مغناطیسی مس نیز باعث کاهش مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات قانون نزدیکی به اشباع نشان داد که با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی کبالت، مقادیر ثابت ناهمسانگردی افزایش می‌یابد، این در حالی است که با افزایش ضخامت لایه غیر مغناطیسی و میانی مس مقادیر ثابت ناهمسانگردی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند.

کلید واژه‌ها: سه لایه‌ای کبالت - مس، ناهمسانگردی مغناطیسی، حلقه پسماند، مقاومت مغناطیسی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Afrooz, Soraya; Ghazi, Mohammad Ebrahim; Izadifard, Morteza; " Effect of Copper thickness on structural and magnetic properties of Co/Cu/Co magnetic nano layers", 5Th International Congress on Nanoscience and Nanotechnology held at the Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Oct 2014.

۲- افروز، ثریا؛ قاضی محمد ابراهیم؛ ایزدی فرد، مرتضی؛ (۱۳۹۳)، "بررسی اثر ضخامت لایه کبالت بر خواص مغناطیسی نانولایه‌های Co/Cu/Co"، دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم ریاضی و فیزیک، دانشگاه جامع علمی کاربردی تهران.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فصل اول.....۱

۱-۱ نظریه مغناطیسی مواد.....۲

۲-۱ مغناطش.....۲

۳-۱ پسماند مغناطیسی.....۳

۴-۱ دسته‌بندی مواد مغناطیسی.....۴

۱-۴-۱ دیا مغناطیس.....۴

۲-۴-۱ پارامغناطیس.....۵

۳-۴-۱ فرو مغناطیس.....۵

۴-۴-۱ پادفرومغناطیس.....۶

۵-۴-۱ فری مغناطیس.....۶

۵-۱ برهمکنش تبادلی.....۷

۶-۱ جفت‌شدگی تبادلی بین لایه‌ای.....۹

۷-۱ حوزه‌های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس.....۱۱

۸-۱ ناهمسانگردی مغناطیسی.....۱۰

۹-۱ مقاومت مغناطیسی.....۱۳

فصل دوم.....۱۹

۲۰	۱-۲ مقدمه.....
۲۰	۲-۲ دستگاه تبخیر حرارتی.....
۲۳	۳-۲ آماده‌سازی زیرلایه.....
۲۳	۴-۲ عملیات لایه‌نشانی.....
۲۵	۵-۲ ضخامت‌سنجی.....
۲۵	۶-۲ معرفی ادوات مشخصه‌یابی نمونه‌ها.....
۲۵	۶-۲-۱ ریخت‌شناسی (مورفولوژی سطح).....
۲۷	۷-۲ مشخصه‌یابی ساختاری به کمک طیف پراش پرتو X.....
۲۹	۸-۲ مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM).....
۳۱	۹-۲ اندازه‌گیری ناهمسانگردی.....
۳۱	۹-۲-۱ قانون نزدیکی به اشباع.....
۳۲	۱۰-۲ اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی.....
۳۵	فصل سوم.....
۳۶	۱-۳ مقدمه.....
۳۷	۲-۳ بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu.....
۵۳	فصل چهارم.....
۵۴	۱-۴ مقدمه.....
	۲-۴ بررسی اثر تغییر ضخامت لایه کبالت بر خواص ساختاری و مغناطیسی چندلایه‌ای

۵۴.....	Co/Cu/Co
۵۵.....	۳-۴ خواص ساختاری
۵۷.....	۱-۳-۴ ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها
۵۸.....	۲-۳-۴ خواص مغناطیسی
۶۴.....	۳-۳-۴ اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی
۶۹.....	۴-۳-۴ بررسی قانون نزدیکی به اشباع
۷۹.....	۴-۴ بررسی تأثیر ضخامت لایه مس بر خواص فیزیکی نانو لایه‌های Co/Cu/Co
۸۰.....	۱-۴-۴ خواص ساختاری
۸۱.....	۲-۴-۴ خواص مغناطیسی
۸۵.....	۳-۴-۴ اندازه‌گیری‌های مقاومت مغناطیسی
۸۷.....	۴-۴-۴ بررسی قانون نزدیکی به اشباع

فهرست شکل؛

عنوان.....صفحه

شکل ۱-۱: منحنی نوعی پسماند مغناطیسی [۱]..... ۴

شکل ۲-۱: جهت گیری گشتاورهای مغناطیسی در مواد مختلف، الف) دیامغناطیس نظیر Au،

Cu، ب) پارامغناطیس نظیر Pt، Mn، ج) فرومغناطیس نظیر Ni، Fe، Co، د) پاد فرومغناطیس Cr، ه) فری مغناطیس نظیر فریت بارییم [۲]..... ۷

شکل ۳-۱: طرح واره‌ای از جفت شدگی بین دو لایه فرومغناطیس جدا شده توسط یک لایه غیر

مغناطیسی، جهت مغناطش لایه‌های فرومغناطیس توسط علامت پیکان نشان داده شده است الف)

جفت شدگی پاد فرومغناطیس، ب) جفت شدگی فرومغناطیس [۵]..... ۹

شکل ۴-۱: دیواره بلاخ ۱۸۰ درجه [۱]..... ۱۲

شکل ۵-۱: مغناطش برحسب میدان مغناطیسی اعمالی برای تک‌بلور کبالت [۸].....

۱۰.....

شکل ۶-۱: تغییرات مقاومت مغناطیسی برحسب میدان اعمالی در دمای اتاق برای دو

نمونه Co/Cu و Fe/Cr [۶]..... ۱۴

شکل ۷-۱: تغییرات نوسانی مقاومت مغناطیسی نمونه Co/Cu به عنوان تابعی از ضخامت لایه

جداساز مس در دمای اتاق [۶]..... ۱۵

شکل ۱-۲: فیلامان‌ها و بوته های گوناگونی که در لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی به کار

گرفته می‌شوند..... ۲۲

شکل ۲-۲: تصویر بوته گردان دستگاه تبخیر حرارتی..... ۲۴

- شکل ۳-۲: دستگاه تبخیر حرارتی مستقر در آزمایشگاه نانو فیزیک دانشگاه شاهرود. ۲۴
- شکل ۴-۲: (الف) میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بکار گرفته شده در بررسی ساختاری نمونه های تهیه شده مستقر در دانشگاه تهران (ب) تصویر شماتیک از اجزاء داخلی مسیر عبور باریکه الکترونی تا سطح نمونه. ۲۶
- شکل ۵-۲: (الف) دستگاه پراش پرتو x مدل Bruker-AXS در دانشگاه دامغان و (ب) محل قرار گرفتن نمونه. ۲۹
- شکل ۶-۲: طرحواره ای از یک دستگاه VSM [۱]. ۳۰
- شکل ۷-۲: نحوه قرار گرفتن اتصالات بر روی نمونه [۵]. ۳۳
- شکل ۸-۲: دستگاه استفاده شده برای محاسبه مقاومت مغناطیسی در دانشگاه شاهرود. ۳۳
- شکل ۱-۳: طیف های XRD نمونه های چند لایه ای Co/Cu تهیه شده [۱۵]. ۳۸
- شکل ۲-۳: طیف های XRD بدست آمده از نمونه های Co/Cu ۶ و ۹ [۱۵]. ۳۸
- شکل ۳-۳: حلقه های پسماند نمونه ها، وابستگی مغناطش به الف) ضخامت لایه کبالت، ب) ضخامت لایه مس [۱۵]. ۳۹
- شکل ۴-۳: حلقه های M-H نمونه های $(Co/Cu/Co)_2$ برای ضخامت های مختلف لایه مس [۱۶]. ۴۱
- شکل ۵-۳: تغییرات مقادیر میدان اشباع برای هر دو گروه الف) ضخامت لایه مس ۴ نانومتر و ضخامت لایه مس ۱۰ - ۵ نانومتر، ب) ضخامت لایه مس ۶ نانومتر و ضخامت کبالت ۲۲ - ۸ نانومتر [۱۷]. ۴۲
- شکل ۶-۳: تغییرات مقادیر میدان اشباع با ضخامت لایه مس برای حالت $n=50$ [۱۷]. ۴۳

- شکل ۳-۷: تغییرات مقادیر میدان مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی برای حالت $n=50$ با زیر لایه ITO [۱۷]. ۴۴.....
- شکل ۳-۸: تغییرات مقادیر مقاومت مغناطیسی با ضخامت لایه کبالت برای دو حالت ضخامت مس ۲ و ۴ نانومتر برای حالت $n=50$ [۱۷]. ۴۵.....
- شکل ۳-۹: تغییرات مقادیر مقاومت مغناطیسی بزرگ با ضخامت لایه مس برای حالت $n=50$ [۱۷]. ۴۵.....
- شکل ۳-۱۰: منحنی تغییرات GMR بر حسب ضخامت لایه کبالت [۱۴]. ۴۶.....
- شکل ۳-۱۱: تصاویر SEM چند لایه‌ای‌های Co/Cu (الف) در مقیاس $1\text{ m}\mu$ ، (ب) در مقیاس nm ۲۰۰ [۱۸]. ۴۷.....
- شکل ۳-۱۲: تصاویر سطحی و خطی میکروسکوپ نیروی اتمی. تصاویر خطی با مقیاس یکسان از توپولوژی سطح متفاوت از دو نمونه چند لایه‌ای Co/Cu [۱۹]. ۴۸.....
- شکل ۳-۱۳: منحنی مغناطش نوارهای Nd-Fe-B بر حسب میدان مغناطیسی شکل ضمیمه منحنی مغناطش تجربی (نقطه) و محاسبه شده از رابطه (۳-۱) (خط) را نشان می‌دهد [۲۰]. ۴۹.....
- شکل ۳-۱۴: سهم جملات $(M_S \frac{a_1}{H})$ ، $(M_S \frac{a_2}{H^2})$ و χ_{hf} و مجموع آن‌ها در رابطه (۳-۱) برای منحنی مغناطش [۲۰]. ۵۰.....
- شکل ۴-۱: طیف XRD نمونه Co(۴۵nm)/Cu(۱۵nm)/Co(۴۵nm) تهیه شده به روش تبخیر حرارتی. ۵۵.....
- شکل ۴-۲: طیف XRD نمونه Co(۶۰nm)/Cu(۱۵nm)/Co(۶۰nm) تهیه شده به روش تبخیر حرارتی. ۵۶.....
- شکل ۴-۳: تصاویر FESEM از سطح لایه‌های Co/Cu/Co با ضخامت لایه مس ثابت ۱۵

نانومتر و ضخامت لایه‌ها کبالت متغیر، الف) ۱۵، ب) ۳۰ و ج) ۴۵ نانومتر. ۵۷

شکل ۴-۴: منحنی‌های پسماند نمونه $\text{Co}(45\text{nm})/\text{Cu}(15\text{nm})/\text{Co}(45\text{nm})$ ، اندازه‌گیری شده در دو حالت میدان اعمالی موازی و عمود بر سطح نمونه الف) میدان مغناطیسی در بازه ۱۰۰۰- تا ۱۰۰۰ اورستد، ب) میدان مغناطیسی در بازه ۲۵۰- تا ۲۵۰ اورستد. ۵۹

شکل ۴-۵: حلقه‌های پسماند نمونه‌های جدول (۴-۲) الف، ب) نمونه ۱ با ضخامت لایه کبالت ۱۵ نانومتر، ج، د) نمونه ۲ با ضخامت لایه کبالت ۳۰ نانومتر، ج و ت) نمونه ۳ ضخامت لایه کبالت ۴۵ نانومتر (تمام نمونه‌ها ضخامت لایه مس ثابت و ۱۵ نانومتر). ۶۲

شکل ۴-۶: تغییرات پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند بر حسب ضخامت لایه کبالت الف) میدان وادارندگی، ب) مغناطش اشباع، ج) مغناطش باقیمانده، د) نسبت چهار گوشه. ۶۳

شکل ۴-۷: نمودار جریان بر حسب ولتاژ در ساختار سه لایه‌ای $\text{Co}(45\text{nm})/\text{Cu}(15\text{nm})/\text{Co}(45\text{nm})$ ۶۵

شکل ۴-۸: تغییرات مقاومت مغناطیسی بر حسب میدان اعمالی برای نمونه‌های با ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت متغیر ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نانومتر، در حالت الف) مقاومت مغناطیسی طولی، ب) مقاومت مغناطیسی عرضی. ۶۷

شکل ۴-۹: نمودارهای مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی و برآزش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۳-۸)، الف و ب) میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه، ج و د) میدان مغناطیسی عمود با سطح نمونه. ۷۱

شکل ۴-۱۰: نمودارهای مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی و برآزش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۳-۹)، الف و ب) میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه، ج و د) میدان مغناطیسی عمود با سطح نمونه. ۷۳

شکل ۴-۱۱: نمودارهای مغناطش برحسب $H^{-\frac{1}{2}}$ برای نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه های کبالت ۴۵ نانومتر)، الف) میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه (محدوده میدان ۱۰۰ تا ۴۰۰ اورستد)، ب) میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه (محدوده میدان ۱۵۰ تا ۵۰۰ اورستد)..... ۷۴

شکل ۴-۱۲: نمودارهای مغناطش برحسب H^{-2} برای نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه های کبالت ۴۵ نانومتر)، الف) میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه (محدوده میدان ۳۰۰ تا ۶۰۰ اورستد)، ب) میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه (محدوده میدان از ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ اورستد)..... ۷۵

شکل ۴-۱۳: نمودارهای مغناطش نمونه های ۱، ۲ برحسب $H^{-\frac{1}{2}}$ (محدوده میدان ۹۰ تا ۱۰۰۰ اورستد)..... ۷۷

شکل ۴-۱۴: نمودارهای مغناطش نمونه های ۱، ۲ برحسب H^{-2} (محدوده میدان ۳۰۰ تا ۸۰۰ اورستد)..... ۷۷

شکل ۴-۱۵: برازش داده های تجربی با رابطه (۴-۲) مربوط به ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه های کبالت ۱۵، ۳۰ نانومتر..... ۷۸

شکل ۴-۱۶: تصاویر FESEM لایه های Co/Cu/Co با ضخامت لایه های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس متغیر الف) (۳۰، ب) ۴۵ و ج) ۶۰ نانومتر..... ۸۱

شکل ۴-۱۷: حلقه های پسماند نمونه های Co/Cu/Co با ضخامت لایه های کبالت ثابت و لایه مس متغیر الف) (۳۰، ب) ۴۵ و ج) ۶۰ نانومتر..... ۸۳

شکل ۴-۱۸: تغییرات پارامترهای به دست آمده از منحنی های پسماند بر حسب ضخامت لایه مس الف) میدان وادارندگی، ب) مغناطش اشباع، ج) مغناطش باقیمانده، د) نسبت چهار گوشه..... ۸۴

- شکل ۴-۱۹: نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب میدان مغناطیسی در نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه کبالت متغیر ۴۵،۳۰ و ۶۰ نانومتر، الف) مقاومت مغناطیسی طولی، ب) مقاومت مغناطیسی عرضی. ۸۵.....
- شکل ۴-۲۰: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ برحسب $H^{-\frac{1}{2}}$ در محدوده میدان (۱۵۰ تا ۱۱۰۰ اورستد). ۸۷.....
- شکل ۴-۲۱: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ برحسب H^{-2} (محدوده میدان از ۳۰ تا ۱۰۰ اورستد). ۸۸.....
- شکل ۴-۲۲: برازش داده‌های تجربی با رابطه (۳-۹) مربوط به نمونه‌هایی با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس ۴۵، ۳۰ و ۶۰ نانومتر. ۸۹.....

لیست جداول

عنوان.....	صفحه
جدول ۱-۳: مشخصات لایه‌های انباشت شده با ضخامت مس ثابت [۱۶].	۳۷.....
جدول ۲-۳: مشخصات نمونه‌های رشد داده شده [۱۸].	۴۰.....
جدول ۱-۴: مشخصات نمونه‌های تهیه شده با ضخامت لایه مس ثابت و ضخامت لایه‌های کبالت متغیر.	۵۰.....
جدول ۲-۴: نتایج بدست آمده از داده‌های طیف XRD مربوط به نمونه	۵۲.....
جدول ۳-۴: نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های منحنی‌های پسماند نانو لایه	۶۰.....
جدول ۴-۴: پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند شکل (۳-۴) (ضخامت لایه مس ثابت و ضخامت لایه‌های کبالت متغیر).	۵۸.....
جدول ۵-۴: مقادیر مقاومت مغناطیسی طولی و عرضی اندازه‌گیری شده نمونه‌های جدول (۴-۲).	۶۸.....
جدول ۶-۴: نتایج به دست آمده از برازش $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} با داده‌های تجربی مربوط به نمونه ۳ (ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر و ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر) شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲).	۶۹.....
جدول ۷-۴: نتایج به دست آمده از برازش رابطه (۲-۹) با داده‌های تجربی نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر).	۷۰.....

جدول ۴-۸: نتایج به دست آمده از برازش $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} با داده‌های تجربی جدول (۴-۲)..... ۷۱

جدول ۴-۹: نتایج حاصل از: برازش رابطه (۲-۹) با داده‌های تجربی مربوط به ضخامت لایه مس

ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نانومتر. ۷۲

جدول ۴-۱۰: مشخصات نمونه‌های تهیه شده. ۷۳

جدول ۴-۱۱: پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند نمونه‌های Co/Cu/Co با

ضخامت لایه‌های کبالت ثابت و لایه مس متغیر. ۸۲

جدول ۴-۱۲: مقادیر مقاومت مغناطیسی طولی و عرضی اندازه‌گیری شده نمونه‌های جدول (۴-۴)

..... (۱۰). ۷۹

جدول ۴-۱۳: نتایج به دست آمده از برازش داده‌های تجربی مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ با

جملات بسط رابطه (۲-۹)، بر حسب $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} ۸۸

جدول ۴-۱۴: نتایج حاصل از برازش رابطه (۲-۹) با داده‌های تجربی مربوط به نمونه‌هایی با

ضخامت لایه‌های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نانومتر. ۹۰

۱ فصل اول

مروری اجمالی بر خواص معناطیسی مواد و چند لایه های معناطیسی

۱-۱ نظریه مغناطیسی مواد

مواد دارای خواص مغناطیسی مختلفی می‌باشند که بر اساس این خواص طبقه‌بندی می‌گردند که این مواد را در ادامه مورد بررسی قرار می‌دهیم. ابتدا بعضی از مفاهیم اساسی در مغناطیس را معرفی می‌کنیم.

۲-۱ مغناطش

اگر گشتاور مغناطیسی متوسط هر اتم یا مولکول را با m نشان دهیم و تعداد اتم‌ها یا مولکول‌ها در واحد حجم N باشند، مغناطش $\vec{M}$ ^۱ یک نمونه به صورت گشتاور مغناطیسی کل در واحد حجم تعریف می‌شود و جمع برداری تمام گشتاورهای مغناطیسی در نمونه، تقسیم بر حجم نمونه می‌شود:

$$\vec{M} = N m \quad (1-1)$$

چون مواد مغناطیسی بر اساس تراوایی^۲ و پذیرفتاری^۳ طبقه‌بندی می‌شوند، در اینجا تعریفی از دو پارامتر ارائه می‌کنیم:

تراوایی مطابق رابطه (۲-۱) به صورت نسبت القاء مغناطیسی $\vec{B}$ به شدت میدان مغناطیسی $\vec{H}$ تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (2-1)$$

پذیرفتاری یک نمونه به صورت نسبت مغناطش $\vec{M}$ در یک دمای معین به میدان اعمالی $\vec{H}$ تعریف

¹Magnetization

²Permeability

³Susceptibility

می‌شود:

$$\chi = \frac{\vec{M}}{H} \quad (3-1)$$

منشأ خواص مغناطیسی مواد به حرکت مداری و اسپینی الکترون‌ها نسبت داده می‌شود، که جمع برداری گشتاورهای آن‌ها گشتاور مغناطیسی کل را می‌دهد. اتم‌های معینی که ترازهای انرژی‌شان کاملاً پر نیست دارای یک گشتاور مغناطیسی خالص هستند. مقدار گشتاور مغناطیسی یک جسم معیاری برای شدت مغناطش آن است. وقتی بلورهای حجیم از اتم‌هایی که گشتاور مغناطیسی خالص دارند تشکیل می‌شود، در چگونگی همسو شدن گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های منفرد نسبت به هم، چند وضعیت مختلف می‌تواند رخ دهد که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است [۱].

۳-۱ پسماند مغناطیسی

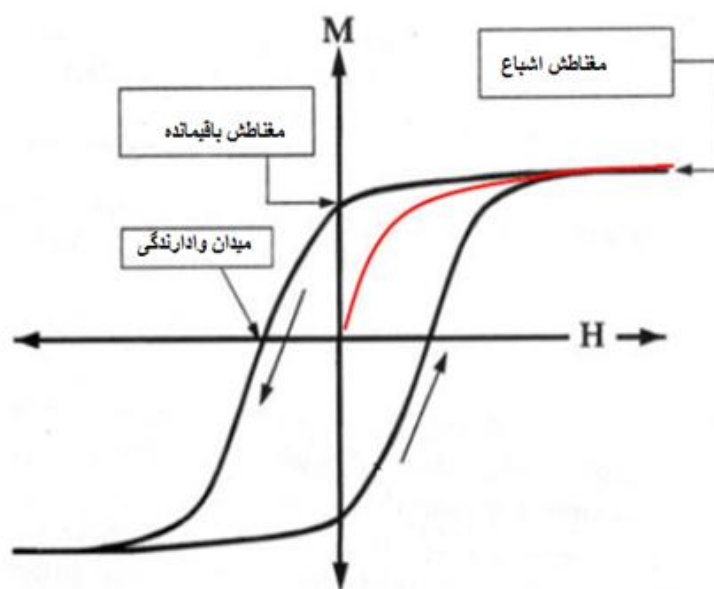
حلقه پسماند^۱ مغناطیسی، اطلاعات قابل توجهی از خصوصیات مغناطیسی یک ماده به دست می‌دهد. در شکل (۱-۱)، یک حلقه پسماند نوعی نشان داده شده است. در این شکل، رفتار غیرخطی مغناطش (M) بر حسب شدت میدان مغناطیسی (H) دیده می‌شود. پارامترهای مهم نشان داده شده بر روی حلقه‌ی پسماند عبارت‌اند از: مغناطش اشباع^۲ (M_S)، مغناطش باقیمانده (M_r) و میدان وادارندگی^۳ (H_C). همان‌طور که در شکل (۱-۱) دیده می‌شود با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مغناطش ماده به یک مقدار بیشینه (مغناطش اشباع) می‌رسد و با افزایش بیشتر شدت میدان مغناطیسی، مغناطش بزرگ‌تری را ایجاد نمی‌کند، زیرا گشتاورهای مغناطیسی همه اتم‌ها با میدان مغناطیسی خارجی هم‌جهت شده‌اند. چنانچه شدت میدان کاهش یابد، مغناطش حتی هنگامی که شدت به صفر می‌رسد، در ماده باقی

¹Hysteresis loop

²Saturation field

³Coercivity field

می‌ماند. مغناطش در شدت میدان مغناطیسی صفر را مغناطش باقیمانده (M_r) گویند. در این حالت، مغناطش باقیمانده مثبت است. سپس با افزایش شدت میدان مغناطیسی در جهت عکس، مغناطش به صفر می‌رسد. شدت میدان مغناطیسی را در این وضعیت میدان وادارندگی (H_C) می‌گویند. در این حالت میدان وادارندگی منفی است. با افزایش بیشتر میدان در این جهت، ماده در جهت منفی به اشباع (M_s) خواهد رسید. در این حالت، اگر مجدداً شدت میدان مغناطیسی در جهت عکس صفر شده و افزایش داده شود حلقه پسماند کامل خواهد شد. وادارندگی مثبت و منفی، همانند مغناطش‌های اشباع باقیمانده مثبت و منفی، باید مقادیر قدر مطلق یکسانی داشته باشند [۱].



شکل ۱-۱: منحنی نوعی پسماند مغناطیسی [۱].

۴-۱ دسته‌بندی مواد مغناطیسی

۱-۴-۱ دیا مغناطیس

دیا مغناطیس‌ها به دلیل پر بودن ترازهای اتمی گشتاور مغناطیسی خالص ندارند. این مواد هنگامی که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، گشتاور دوقطبی در آن‌ها القاء می‌شود. جهت دوقطبی‌های القاء شده در این مواد بر خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی می‌باشد که این امر باعث می‌شود ماده دیا مغناطیس از میدان مغناطیسی دفع شود [۱].

۲-۴-۱ پارامغناطیس

پارامغناطیس‌ها موادی هستند که در آنها گشتاورهای مغناطیسی به‌طور تصادفی نسبت به هم قرار گرفته‌اند و گشتاور مغناطیسی خالص بلور صفر است. اعمال یک میدان مغناطیسی بعضی از گشتاورها را همسو می‌کند و به بلور یک گشتاور خالص کوچک غیر صفر می‌دهد. پذیرفتاری این مواد از رابطه (۴-۱) پیروی می‌کند که به معادله کوری^۱ معروف است. این رابطه نشان می‌دهد پذیرفتاری با دما نسبت عکس دارد [۱].

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (4-1)$$

۳-۴-۱ فرو مغناطیس

در مواد فرومغناطیس حتی بدون اعمال میدان مغناطیسی همه‌ی گشتاورها در یک جهت قرار دارند و بنابراین گشتاور مغناطیسی خالص بلور غیر صفر است و این ماده مانند یک آهنربای میله‌ای که در خارج

¹Curie equation

خود میدان مغناطیسی تولید می‌کند، رفتار خواهد کرد. آثار فرومغناطیسی فقط در دماهای پایین‌تر از دمای گذار (دمای کوری)^۱ ظاهر می‌شوند. این دما به نوع ماده فرومغناطیس بستگی دارد. بالای این دما، گشتاورهای مغناطیسی به صورت کاتوره‌ای جهت‌گیری می‌کنند، در نتیجه مغناطش کل صفر می‌شود که در این ناحیه ماده پارامغناطیس می‌شود. پذیرفتاری فرومغناطیس‌ها با رابطه (۵-۱) بیان می‌گردد که به قانون کوری ویس^۲ موسوم است. در این رابطه ثابت C ثابت کوری و θ ثابت میدان ملکولی است [۱].

$$\chi = \frac{C}{T - \theta} \quad (5-1)$$

این معادله می‌تواند پذیرفتاری مواد فرومغناطیس را در دماهای بالا به طور نسبتاً مناسبی توصیف نماید. در $T = \theta$ پذیرفتاری واگرا می‌شود و برای $T < \theta$ مغناطش غیر صفر شده و با کاهش دما مغناطش افزایش می‌یابد. در دمای صفر کلونین مغناطش به بیشینه مقدار خود می‌رسد که حالت اشباع نامیده می‌شود [۱].

۴-۴-۱ پادفرومغناطیس

در یک ماده پادفرومغناطیس، گشتاورها به صورت یک طرح‌واره‌ای پادموازی در جهت مخالف یکدیگر مرتب می‌شوند و در نتیجه ماده هیچ گشتاور مغناطیسی خالصی از خود نشان نمی‌دهد [۱].

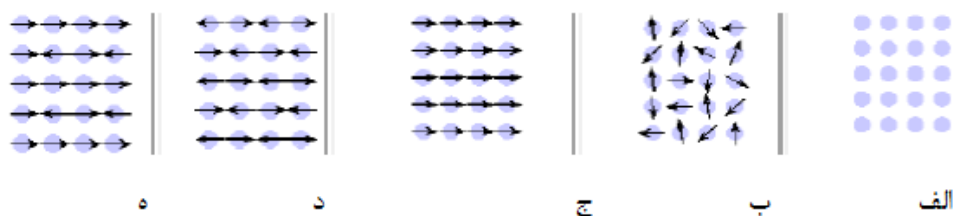
۵-۴-۱ فری مغناطیس

اگر یک بلور از دو نوع اتم که هر کدام یک گشتاور مغناطیسی با شدت‌های مختلف دارند ساخته شده باشد بزرگی گشتاورهای مغناطیسی در دو زیر شبکه یکسان نخواهد بود، در نتیجه در این مواد نیز بلور دارای گشتاور مغناطیسی خالص است و مانند یک آهنربای میله‌ای رفتار می‌کند. در واقع این مواد

¹Curie temperature

²Curie Weiss

هنگامی که مغناطیده می‌شوند رفتارشان خیلی شبیه مواد فرومغناطیس است [۱]. شکل (۲-۱)، جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در انواع مواد مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در مواد مختلف، الف) دیامغناطیس نظیر Au, Cu، ب) پارامغناطیس نظیر Pt, Mn، ج) فرومغناطیس نظیر Fe, Co, Ni، د) پاد فرومغناطیس Cr، ه) فری مغناطیس نظیر فریت باریم [۲].

در اینجا این سؤال مطرح می‌شود که چرا گشتاورهای اتمی منفرد در بعضی مواد همسو و در بعضی دیگر غیرهمسو می‌شوند. یا به‌طور دقیق‌تر چرا بعضی مواد مثل فرومغناطیس‌ها و فری مغناطیس‌ها می‌توانند حتی در غیاب میدان مغناطیسی نیز گشتاور مغناطیسی غیر صفر داشته باشند درحالی‌که موادی مثل پارامغناطیس‌ها گشتاور مغناطیسی صفر دارند. وقتی یک میدان مغناطیسی به یک آهنربای میله‌ای اعمال می‌شود، گشتاور مغناطیسی تمایل به همسویی با میدان اعمالی دارد. اطراف هر اتم در یک بلور، یک میدان مغناطیسی وجود دارد. اگر گشتاور مغناطیسی به‌اندازه کافی بزرگ باشد می‌تواند نزدیک‌ترین همسایه‌هایش را مجبور کند که در همان جهت سمت‌گیری نماید. بنابراین این میدان می‌تواند یک انرژی برهم‌کنشی بزرگ‌تر از انرژی گرمایی ارتعاشی اتم‌ها در شبکه فراهم آورد. برهم‌کنش میان گشتاورهای مغناطیسی اتمی دو نوع است، الف) برهم‌کنش دوقطبی دوقطبی، ب) برهم‌کنش تبادل [۳].

۵-۱ برهم‌کنش تبادل

الکترون‌ها یک گشتاور مغناطیسی اسپینی دارند. بنابراین اعمال میدان مغناطیسی، بردار گشتاور اسپینی آن‌ها را مجبور می‌کند تا با میدان همسو شوند. راستای گشتاور اسپینی می‌تواند نسبت به راستای

میدان مغناطیسی دو انتخاب $\pm \frac{1}{2} \mu_B$ داشته باشند که در آن μ_B واحد گشتاور مغناطیسی است که (مگنتون بور)^۱ نامیده می‌شود. اعداد $\pm \frac{1}{2}$ اعداد کوانتومی اسپینی m_s نام دارند. تابع موج نشان دهنده حالت $\mu_B + \frac{1}{2}$ را با A و $\mu_B - \frac{1}{2}$ با B مشخص شده است. در سامانه دو الکترونی ممکن نیست که بتوان مشخص کرد که کدام الکترون در کدام حالت است. اصل طرد پائولی به الکترون‌ها اجازه نمی‌دهد که در یک تراز انرژی، عدد کوانتومی اسپینی m_s یکسان داشته باشند. برای این وضعیت، مکانیک کوانتومی با این الزام که تابع موج الکترون‌ها پادمتقارن است مداخله می‌کند، به این صورت که اگر دو الکترون جابه‌جا شوند، علامت‌های مثبت و منفی در رابطه (۶-۱) تغییر می‌کنند. شکل تابع موج منطبق بر این شرایط به صورت زیر است [۳]:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\Psi_A(1)\Psi_B(2) - \Psi_A(2)\Psi_B(1)] \quad (۶-۱)$$

انرژی الکتروستاتیکی نیز برای این حالت با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \int \left[\frac{1}{r_{12}} \right] [\Psi_A(1)\Psi_B(2) - \Psi_A(2)\Psi_B(1)]^2 dv_1 dv_2 \quad (۷-۱)$$

با بسط مربع تابع موج‌ها دو جمله زیر به دست می‌آید:

$$E = \int \left[\frac{e^2}{r_{12}} \right] [\Psi_A(1)\Psi_B(2)]^2 dv_1 dv_2 - \int \left[\frac{e^2}{r_{12}} \right] [\Psi_A(1)\Psi_B(1)\Psi_A(2)\Psi_B(2)] dv_1 dv_2 \quad (۸-۱)$$

جمله اول، برهم‌کنش کولنی معمولی بین دو ذره باردار است. جمله دوم که برهم‌کنش تبدالی^۲ نام دارد، نشان دهنده‌ی اختلاف در انرژی کولنی بین دو الکترون با اسپین‌های موازی و پادموازی است. تحت فرض‌های معین، می‌توان برهم‌کنش تبدالی را به شکل ساده‌تر $\vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2$ نوشت که در آن J انتگرال تبدالی^۳ یا ثابت برهم‌کنش تبدالی نامیده می‌شود. برای یک ماده پاد فرومغناطیس، J منفی و برای یک

¹Bohr magneton

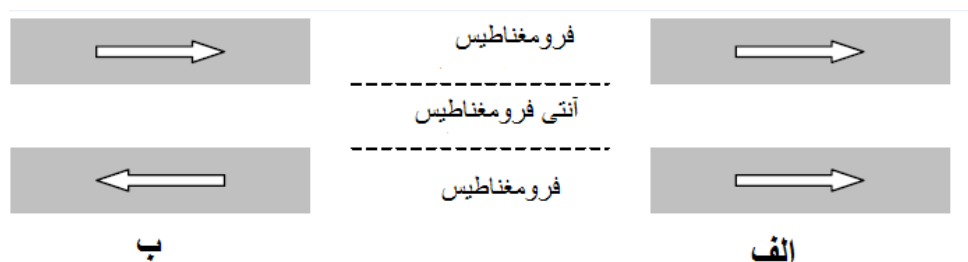
²Exchange interaction

³Exchange integral

ماده فرومغناطیس J مثبت است. به دلیل اینکه برهم کنش تبادلی، همپوشانی اوربیتال ها را شامل می شود، این برهم کنش اساساً یک برهم کنش بین نزدیک ترین همسایه ها است و به طور کلی برهم کنش غالب است [۳].

۶-۱ جفت شدگی تبادلی بین لایه ای

در چند لایه های مغناطیسی شامل دولایه فرومغناطیس مانند (Ni, Fe, Co) که توسط یک لایه غیر مغناطیسی (Ru, Cu, Cr, Au) از هم جدا شده اند جفت شدگی تبادلی^۱ اتفاق می افتد [۴]. شکل (۳-۱) بردار مغناطش در غیاب میدان مغناطیسی برای دو حالت متفاوت را نشان می دهد. در تصویر (الف) از شکل (۳-۱) بردار مغناطش برای دو لایه مغناطیسی به صورت هم تراز و موازی (جفت شدگی فرومغناطیس) بین آن ها برقرار است. و در تصویر (ب) از شکل (۳-۱) بردار مغناطش برای دو لایه مغناطیسی به صورت هم تراز و غیر موازی (جفت شدگی پاد فرومغناطیس) بین دو لایه مغناطیسی برقرار است [۵]. در سیستم های فلزی برهم کنش تبادلی توسط الکترون های متحرک گسترش یافته و می توانند در مسافت های نسبتاً طولانی انتقال یابند. در واقع برهم کنش های تبادلی می توانند لایه های مغناطیسی را از طریق لایه های فلز غیر مغناطیسی جفت کند.



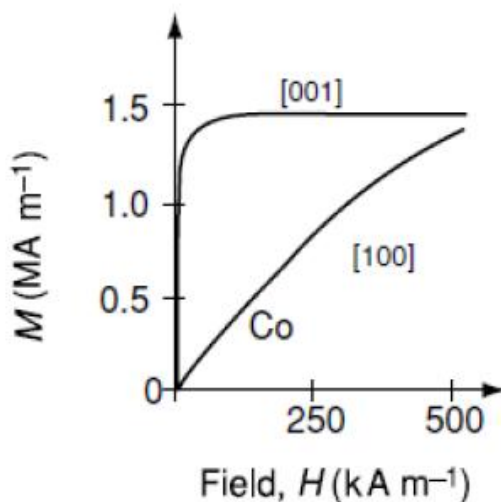
شکل ۳-۱: طرح واره ای از جفت شدگی بین دو لایه فرومغناطیس جدا شده توسط یک لایه غیر مغناطیسی، جهت مغناطش لایه های فرومغناطیس توسط علامت پیکان نشان داده شده است (الف) جفت شدگی فرومغناطیس، (ب) جفت شدگی پاد فرومغناطیس [۵].

¹Exchange coupling

روش‌های تجربی زیادی مانند مگنتومتري، تکنیک‌های Rf، پراکندگی نوترون برای مطالعه جفت‌شدگی تبادلي بين لایه‌ای^۱ وجود دارد [۷]. در چند لایه‌ای‌های فلزی مغناطیسی با افزایش ضخامت لایه جداساز غیر مغناطیسی جفت‌شدگی تبادلي بين لایه‌ای به صورت تناوبی نوسان می‌کند، این دوره تناوب از یک فلز به فلز دیگر متفاوت است و در بیشتر مواد مقدار آن بين ۸ تا ۱۲ آنگستروم است. این مقدار برای Cr به‌طور قابل توجهی بیش از ۱۸ آنگستروم است [۶].

۷-۱ ناهمسانگردی مغناطیسی

در توصیف خواص نانو ساختارهای مغناطیسی از مفهوم انرژی ناهمسانگردی استفاده می‌شود.



شکل ۷-۱: مغناطش برحسب میدان مغناطیسی اعمالی برای تک بلور کبالت [۸].

ناهمسانگردی به مفهوم وابسته بودن خواص فیزیکی به راستای اندازه‌گیری است. در مواد

¹Interlayer exchange coupling

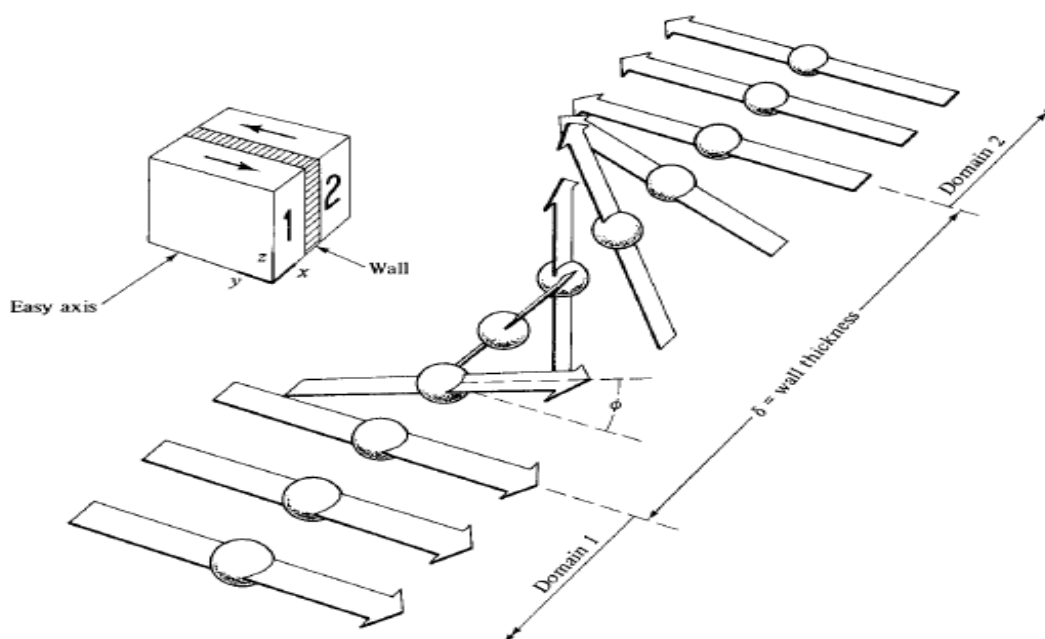
ناهمسانگرد مغناطیسی، بدون صرف انرژی نمی‌توان مغناطش را در هر راستایی قرار داد. راستای آسان (سخت) راستایی است که هنگامی که مغناطش سیستم در آن راستا قرار می‌گیرد، سیستم دارای کمترین (بیشترین) انرژی ناهمسانگردی است [۸]. شکل (۱-۴)، رفتار مغناطش کبالت، هنگامی که در امتداد محورهای آسان^۱ و سخت مغناطیده می‌شود را نشان می‌دهد. منحنی مغناطش کبالت نشان می‌دهد که جهت [۰۰۱] جهت آسان مغناطش و جهت [۱۰۰] جهت سخت مغناطش است [۸].

۸-۱ حوزه‌های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس

مواد فرومغناطیسی شامل ناحیه‌های مشخصی به نام حوزه‌ها هستند، که به علت مغناطیدگی خودبه‌خودی در جهت مشخصی قرار می‌گیرند. عموماً چنین حوزه‌هایی در لایه‌های فرومغناطیس نازک نیز وجود دارند. در مواقع عبور از مرز بین حوزه‌ها جهت‌های اسپین به‌طور ناگهانی تغییر نمی‌کند و ناحیه گذاری وجود دارد که در آن اسپین‌ها به تدریج تغییر می‌کنند. اگر این ناحیه که دیواره‌ی حوزه^۲ نامیده می‌شود، ضخیم باشد، آن‌گاه جهت‌های اسپین‌های مجاور اختلاف کمی خواهند داشت و در نتیجه انرژی برهم‌کنش اسپین - اسپین کوچک است. از طرف دیگر، اگر دیوار نازک باشد، حجم ناحیه گذار کوچک خواهد بود که نتیجه آن انرژی بزرگ برهم‌کنش اسپین - اسپین است. دو نوع دیواره داریم الف) دیواره بلاخ که در آن اسپین‌ها حول محور عمود بر دیواره می‌چرخند، در مواد فرومغناطیس کپه‌ای فراوان است و موسوم به دیواره بلاخ است. چنین آرایشی در یک لایه نازک به میدان وامغناطیده بزرگی در مرکز دیوار می‌انجامد. ب) دیواره نیل که در آن اسپین‌ها در صفحه لایه می‌چرخند و ناحیه گذار حاصل، دیواره نیل نام دارد. این دیواره‌ها در لایه‌های بسیار نازک تشکیل می‌شوند [۹].

¹Easy axis

²Domain wall



شکل ۵-۱: دیواره بلاخ ۱۸۰ درجه [۱].

همانند شکل (۵-۱) دو حوزه مغناطیسی، که زاویه بین بردارهای مغناطش آن‌ها ۱۸۰ درجه باشد، را در نظر می‌گیریم. ناحیه بین این دو حوزه، دیواره ۱۸۰ درجه بلاخ^۱ است. درون دیواره گشتاورهای اتمی به نحوی می‌چرخند تا انرژی تبدلی زیاد نشود. به همین دلیل دیواره تمایل به پهن شدن دارد. از طرفی اگر تعداد گشتاورهای اتمی در داخل دیواره زیاد باشند، انرژی ناهمسانگردی^۲ بیشتری ایجاد می‌کنند. زیرا هر گشتاور مغناطیسی که از راستای محور مغناطش دور می‌شود، سهمی در افزایش انرژی ناهمسانگردی ایجاد می‌کند. بنابراین برای کمینه شدن انرژی ناهمسانگردی بهتر است که دیواره باریکی ایجاد شود. در مجموع کمینه شدن انرژی ناهمسانگردی و تبدلی پیکربندی دیواره با کمترین انرژی را تعیین می‌کند [۱].

^۱Bloch

^۲Anisotropy energy

۹-۱ مقاومت مغناطیسی

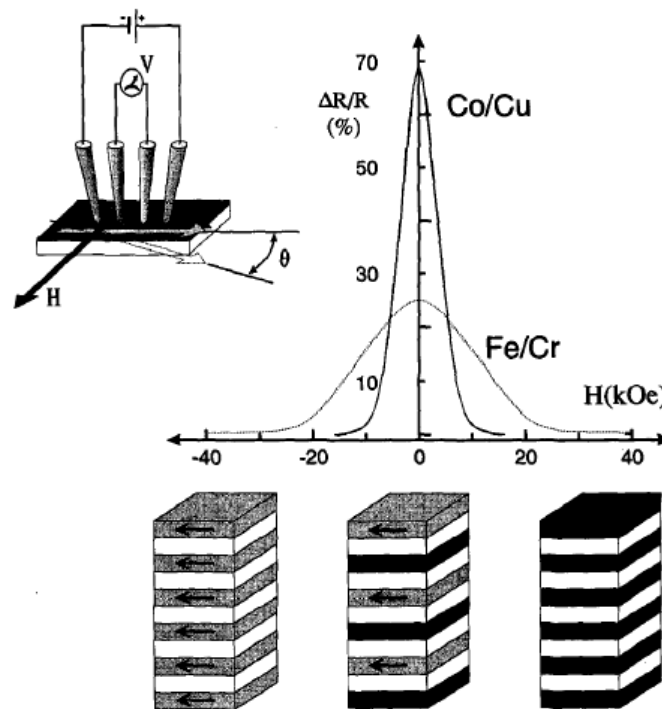
مقاومت مغناطیسی پدیده‌ای است که در آن اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، مقاومت الکتریکی ماده را تغییر می‌دهد. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که الکترون‌های رسانش مجبور به حرکت در مسیرهای مارپیچی حول میدان مغناطیسی اعمالی می‌شوند. این اثر تنها هنگامی آشکار می‌شود که میدان مغناطیسی به اندازه‌ای قوی باشد که مسیر الکترون را در طولی مساوی طول مسیر آزاد میانگین آن خم کند. مسیر آزاد میانگین، مسافت متوسطی است که یک الکترون در فلز هنگام اعمال میدان الکتریکی، قبل از برخورد با اتم‌ها، نقص‌ها یا اتم‌های ناخالص طی می‌کند. مقاومت الکتریکی یک ماده نتیجه پراکنده شدن الکترون‌ها از جهت شارش جریان بر اثر چنین برخوردهایی است. اثر مقاومت مغناطیسی در فلزات تنها در میدان‌های مغناطیسی خیلی بالا و در دماهای پایین اتفاق می‌افتد. در سال ۱۹۸۸ پدیده مقاومت مغناطیسی بزرگ کشف شد، این اثر در موادی دیده شد که به صورت مصنوعی و به وسیله‌ی لایه نشانی روی زیر لایه‌ای خالص ساخته شده بودند. این زیر لایه از لایه‌هایی با ضخامت نانومتری که یک در میان، فلز فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس بودند، شکل گرفته بود. این اثر، ابتدا در لایه‌های متناوب آهن و کروم مشاهده شد، اما پس از آن مواد لایه‌ای دیگر تشکیل شده از لایه‌های متناوب مس و کبالت ساخته شد که اثرات مقاومت مغناطیسی بسیار بزرگ‌تری نمایش می‌داد [۳]. معمولاً برای مقاومت مغناطیسی از روابط بدون بعد زیر استفاده می‌شود [۶]:

$$GMR = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \quad (9-1)$$

$$GMR = \frac{R(H) - R(H_S)}{R(H_S)} \quad (10-1)$$

شکل (۹-۱) تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به میدان اعمالی برای دو نمونه Co/Cu و Fe/Cr در دمای

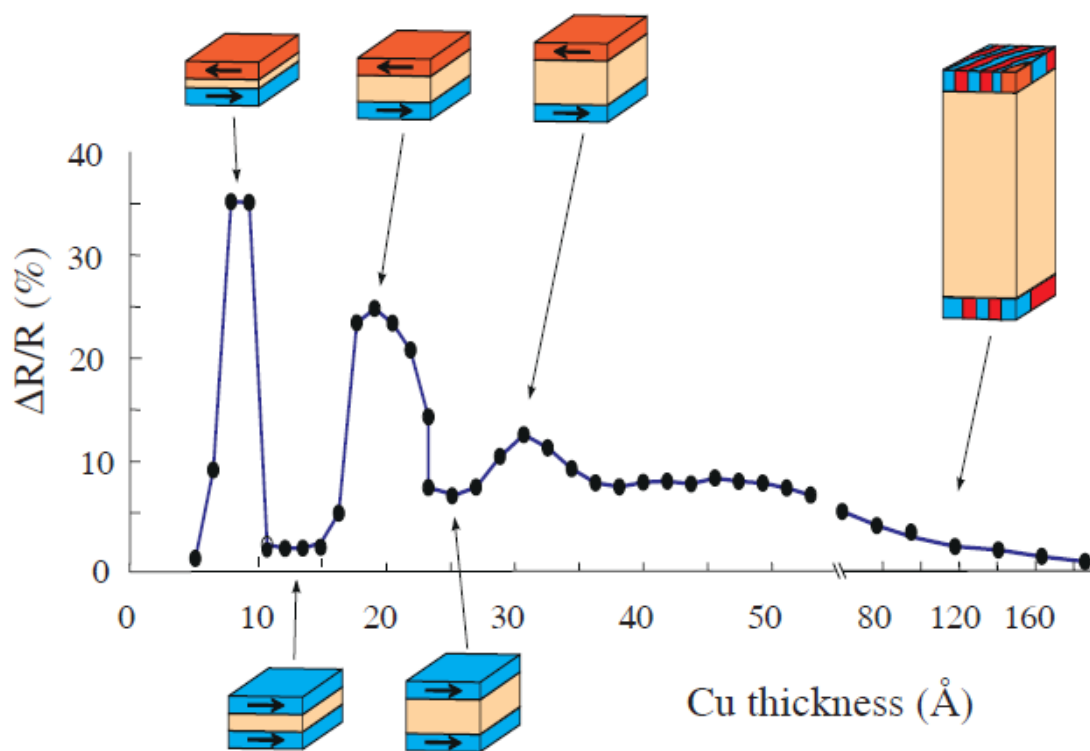
اتاق را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۱-۶: تغییرات مقاومت مغناطیسی برحسب میدان اعمالی در دمای اتاق برای دو نمونه Co/Cu و Fe/Cr [۶].

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی مقدار مقاومت مغناطیسی کاهش می‌یابد و در میدان‌های بالا مقاومت به دست آمده همان مقاومت اشباع است. در میدان‌های کم به‌طور قابل توجهی مقادیر مقاومت مغناطیسی بیشتر از حالتی است که در آن میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه بزرگ است. در شکل (۱-۶) دیده می‌شود که بیشینه مقدار GMR به ازای جفت‌شدگی پاد فرومغناطیس و کمینه مقدار آن به ازای جفت‌شدگی فرومغناطیس لایه‌های مغناطیسی حاصل می‌شود [۶]. همان‌طور که در شکل (۱-۷) برای نمونه Co/Cu نشان داده شده است، مقدار تغییرات مقاومت به ضخامت لایه‌ی جداساز بستگی دارد و در ضخامت ۷ آنگستروم به مقدار بیشینه می‌رسد. این اثر، به دلیل وابستگی پراکندگی الکترون به جهت‌گیری اسپین نسبت به جهت مغناطش آن اتفاق می‌افتد. الکترون‌هایی که اسپین‌هایشان در جهت مغناطش M همسو نیستند، شدیدتر از آن‌هایی که اسپین‌هایشان با M همسو

است، پراکنده می‌شوند. اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی موازی با لایه‌ها، مغناطش‌های همه‌ی لایه‌های مغناطیسی را وادار می‌کند که در یک جهت قرار بگیرند. این وضعیت موجب می‌شود که مغناطش‌هایی که در خلاف جهت میدان مغناطیسی اعمالی هستند تغییر جهت دهند. الکترون‌های رسانش با اسپین‌هایی که در خلاف جهت مغناطش همسو شده‌اند، در سطح مشترک فلز - فرومغناطیس شدیدتر پراکنده می‌شوند و آن‌هایی که در جهت میدان همسو شده‌اند، با شدت کمتری پراکنده می‌شوند. [۳]



شکل ۱-۷: تغییرات نوسانی مقاومت مغناطیسی نمونه Co/Cu به‌عنوان تابعی از ضخامت لایه جداساز مس در دمای اتاق [۶].

۱-۱۰ کاربرد چند لایه‌های مغناطیسی

۱-۱۰-۱ ذخیره سازی مغناطیسی^۱

لایه‌های نازک مغناطیسی می‌توانند به عنوان محیط‌های ذخیره سازی اطلاعات به کار گرفته شوند، بدین صورت که با اعمال میدان مغناطیسی با شدت کافی و با تمرکز بالا به هر نقطه لایه نازک موجب چرخش حوزه‌های مغناطیسی در آن نقطه می‌شود، و به دلیل وجود ناخالصی‌ها، با قطع میدان، مغناطش حوزه‌ها دوباره به حالت اول بر نمی‌گردد. لایه‌های نازک مغناطیسی از نظر جهت‌گیری غالب حوزه‌ها، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. در یک دسته مغناطش غالب حوزه‌ها در صفحه‌ی لایه‌ها قرار دارد (افقی) در حالیکه در دسته‌ی دوم مغناطش حوزه‌ها عمود بر صفحه لایه نازک است (عمودی). ناحیه‌ای از سطح که توسط هر دانه‌ی مغناطیسی اشغال شده است در لایه‌های با جهت‌گیری غالب عمودی حوزه‌ها کوچک‌تر است و نویز مغناطیسی ناشی از لایه نازک مغناطیسی در آن‌ها کمتر است. در عین حال سرعت دسترسی به اطلاعات در این نوع لایه نازک بیشتر است. در نتیجه برای رسیدن به بیشینه چگالی بیت‌ها در واحد سطح و افزایش سرعت دسترسی به اطلاعات باید از این لایه‌ها استفاده کنیم. هرچه قدر بیت‌ها کوچک‌تر و نواحی ذخیره سازی چگال‌تر شود نویز محیط (به طور عمده میدان مغناطیسی محیط) مهم‌تر و سیگنال (مغناطش بیت) ضعیف‌تر می‌شود که در نهایت کاهش زیاد Sig/noise را در پی دارد. برای کم کردن نویز باید از ترکیباتی استفاده کنیم که هم‌بستگی بیت‌ها با یکدیگر ناچیز باشند. یکی از این ترکیبات لایه‌های مغناطیسی است که ساختار آمورف دارند چرا که همبستگی نقاط مختلف این ترکیبات با یکدیگر ناچیز است. مانند استفاده از فیلم آمورف TbFeCo که در تکنولوژی ذخیره و بازخوانی TMO استفاده می‌شود. روش کم کردن هم‌بستگی حوزه‌های مغناطیسی، استفاده از چند لایه‌ها به جای تک لایه‌ی مغناطیسی

¹ Magnetic recording

است. در این حالت به دلیل دور شدن حوزه‌ها از یکدیگر به دلیل حضور نواحی غیر مغناطیسی بین آن‌ها، جفت شدگی بین حوزه‌ها کم می‌شود. ضمن اینکه کم شدن چگالی نواحی مغناطیسی موجب کاهش میدان مغناطیسی محیط در محل هر بیت می‌شود و نویز کاهش می‌یابد.

۱-۱۰-۲ استفاده از چند لایه‌ها به عنوان هسته مغناطیسی نرم هدها

هدهای معمولی از یک سیم پیچ کوچک با یک هسته‌ی مغناطیسی نرم تشکیل شده‌است. وجود هسته‌ی مغناطیسی نرم در هدهای نوشتنی برای تقویت زیاد میدان مغناطیسی سیم پیچ جریان است و در هدهای مربوط به خواندن اطلاعات، برای تقویت سیگنال میدان مغناطیسی کوچک ناشی از بیت می‌باشد. هر چه بخواهیم چگالی بیت‌ها در واحد سطح زیادتر شود و سرعت دسترسی به اطلاعات افزایش یابد باید از هدهای کوچک‌تر و سریع‌تر استفاده کنیم.

۱-۱۰-۳ آشکار سازهای مبتنی بر مقاومت مغناطیسی^۱

از آنجایی که اعمال میدان مغناطیسی به ماده منجر به تغییر مقادیر مقاومت الکتریکی ماده مغناطیسی می‌شود می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، اندازه میدان مغناطیسی محیط را تعیین کرد. در این میان موادی برای استفاده در آشکارساز میدان مغناطیسی مناسبند که اولاً $\frac{\Delta R}{R}$ آن‌ها در میدان مغناطیسی بزرگ باشد و ثانیاً $\frac{\Delta R/R}{\Delta H}$ آن‌ها مقدار قابل توجهی باشد که ΔH میدان مغناطیسی است که در آن $\Delta R = \frac{R_0 - R_S}{2}$ می‌باشد. از آنجا که $\frac{\Delta R}{R}$ مربوط به چندلایه‌های مغناطیسی چند مرتبه از مواد مغناطیسی معمولی بزرگ‌تر است، بنابراین برای استفاده از آشکارسازها ایده‌آل می‌باشند. فقط باید چندلایه‌ها به گونه‌ای طراحی شود که GMR بزرگ در میدان‌های کم اتفاق بیافتد تا $\frac{\Delta R/R}{\Delta H}$ قابل ملاحظه

¹ Magnetoresistive detector

داشته باشیم. در این میان ترکیبات (Co/Cu) برای این منظور مناسبند چرا که ΔH آن‌ها از مرتبه‌ی 1Koe و GMR در حدود ۶۵٪ قابل دستیابی است.

۴-۱۰-۱ هدهای خواننده مبتنی بر مقاومت مغناطیسی

ایده استفاده از تغییر مقاومت مواد در معرض میدان مغناطیسی برای آگاهی از محتوای بیت‌ها بدیهی است. در ابعاد کوچک‌تر استفاده از این هدهای جدید به جای هدهای سنتی گریز ناپذیر است چرا که هرچه اندازه‌ی بیت‌ها کوچک‌تر شود مشکلات متعددی در طراحی هدهای سنتی بروز می‌کند. این مشکلات از قرار زیر است:

با کوچک شدن سیم پیچ، جریان بیشتری باید از آن عبور کند. سیگنال بیت‌های کوچک‌تر کمتر است. با کوچک‌تر شدن هسته‌ی مغناطیسی به دلیل فیزیک حاکم بر حوزه‌های مغناطیسی گذردهی مغناطیسی کم می‌شود. با تقاضای افزایش سرعت دسترسی به اطلاعات، مسائل متعدد مربوط به القاییدگی بروز می‌کند. امکان تهیه هدهای مقاومت مغناطیسی با ابعاد میکرومتر از لایه‌های نازک، تمام مشکلات ذکر شده در بالا را رفع می‌کند.

از دیگر کاربردهای چندلایه‌ای‌های مغناطیسی می‌توان به ابر آینه‌ها^۱، قطبشگرها^۲، تولید کننده‌های باریکه‌های نوترونی تک انرژی^۳ اشاره کرد.

¹ Supermirrors
² Polarizers
³ Monocromators

۲ فصل دوم

مراحل آزمایشگاهی رشد نانولایه Co/Cu/Co به روش تبخیر

حرارتی

۱-۲ مقدمه

روش‌های تهیه لایه‌نازک را اساساً می‌توان به دو گروه، روش‌های شیمیایی (شامل روش‌های الکتروشیمی) و روش‌های فیزیکی تقسیم کرد. مهم‌ترین روش‌های فیزیکی برای تهیه لایه‌های نازک (ساختارهایی با داشتن حداقل یک بعد در اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر) روش کندوپاش کاتدی^۱ و تبخیر در خلأ^۲ هستند. در حال حاضر تبخیر در خلأ متداول‌ترین روش تهیه لایه‌های نازک است. این روش نسبتاً ساده است و در شرایط آزمایشی مناسب می‌توان با استفاده از آن لایه‌های بسیار خالص و تا حدی معین با ساختمان از پیش گزیده‌ای را تهیه نمود [۹].

۲-۲ دستگاه تبخیر حرارتی

یکی از این روش‌های لایه نشانی روش انباشت فیزیکی بخار^۳ (PVD) است، که در خلأ انجام می‌شود. در این روش، مواد توسط یک منبع حرارتی و در محفظه خلأ تبخیر شده و در امتداد مسیری مستقیم بین منبع و زیرلایه، به زیرلایه می‌رسند.

دستگاه‌های تبخیر در خلأ باید دارای شرایط زیر باشند [۹]:

(۱) فشار آستانه به قدر کافی پایین.

(۲) دستیابی به اندازه کافی سریع به فشار آستانه از فشار جو.

(۳) پاک بودن محفظه کار از بخارهای آلی.

(۴) بزرگ بودن و دسترسی آسان به محفظه کار.

¹Cathode sputtering

²Vacuum deposition

³Physical Vapor Deposition

۵) امکان انتقال حرکت به داخل محفظه خلأ.

متداول ترین پمپ‌هایی که در این دستگاه به کار می‌روند پمپ‌هایی هستند که با روغن معدنی یا سیلیکون با کیفیت بالا به عنوان شاره عامل کار می‌کنند، و توسط پمپ‌های چرخشی پیش تخلیه می‌شوند. سرعت پمپاژ معمولاً در سطح چند صد لیتر در ثانیه تنظیم می‌شود. از نفوذ بخارهای روغنی به داخل محفظه‌ی کار با نصب تله‌های مناسب (سپرهایی که با آب یا نیتروژن مایع سرد می‌شوند) در بالای پمپ جلوگیری می‌شود. البته دستیابی به فشارهای آستانه پایین، مستلزم آب‌بندی بودن کافی سیستم و کاربرد مواد با فشار بخار پایین است که قادر به خارج کردن گاز داخلی آن‌ها باشیم [۹].

فرایند تشکیل لایه‌ها به روش تبخیر شامل چندین مرحله فیزیکی است [۹]:

۱) تبدیل ماده‌ای که باید رانشانی شود به حالت گازی از طریق تبخیر یا تصعید.

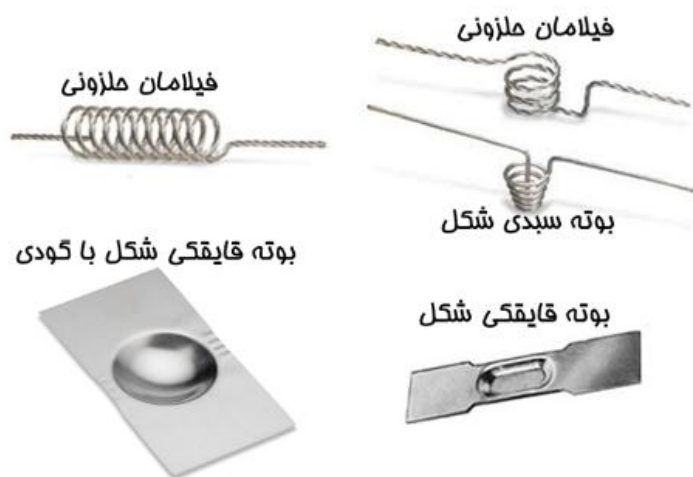
۲) انتقال اتم‌ها از چشمه تبخیر به زیرلایه.

۳) رانشانی این ذره‌ها روی زیرلایه.

۴) بازآرایی یا تغییرات پیوند اتم‌ها روی سطح زیرلایه.

لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی فرآیندی است که در محیط خلأ و به کمک اعمال جریان الکتریکی برای تبخیر ماده منبع صورت می‌گیرد و هدایت و انتقال ماده تبخیر شده به سمت زیرلایه براساس اختلاف فشار میان محلی که ماده منبع و زیرلایه قرار دارد، اتفاق می‌افتد. پارامترهایی که در این نوع لایه نشانی بایستی کنترل شوند، فشار محفظه و دمای بوته‌ای است که ماده منبع در آن قرار می‌گیرد. در این روش، ماده منبع که به‌عنوان پوشش استفاده می‌شود (مانند یک قطعه فلز) در یک ظرف (بوته) که با نام قایقک یا فیلامان نیز شناخته می‌شود و از جنس فلزات مقاوم است، قرار می‌گیرد. با عبور جریان برق از قایقک یا بوته و داغ شدن ماده مورد نظر به‌عنوان ماده منبع و تبخیر آن در محیط خلأ، به دلیل اختلاف

فشاری که بین محل بوته و محل زیرلایه وجود دارد، یک لایه بسیار نازک بر روی زیرلایه قرار می‌گیرد. از آن جایی که در فرایند لایه نشانی مبتنی بر تبخیر حرارتی گرمای بسیار بالایی برای انجام تبخیر نیاز است در صورت حضور گاز اکسیژن، چنانچه فلز تبخیر شده واکنش‌پذیر باشد اکسید فلزی تشکیل می‌شود. از طرفی حضور مولکول‌های هوا در مسیری که ماده تبخیر شده از منبع به سمت زیرلایه حرکت می‌کند، نرخ لایه نشانی را کاهش می‌دهد و مانع از تشکیل لایه با چگالی بالا می‌شود. بنابراین بایستی لایه نشانی در محیط خلأ که تعداد مولکول‌ها کاهش یافته‌اند و تعداد برخوردها کمتر است انجام شود. سه مرحله اصلی در هر فرایند لایه نشانی فیزیکی تحت شرایط خلأ شامل (الف) تبخیر ماده منبع؛ (ب) انتقال بخار از منبع به زیرلایه که می‌خواهیم آن را با ماده منبع پوشش دهیم و (ج) تشکیل لایه نازک روی زیر لایه است. فیلامان‌ها یا قایق‌هایی که برای قرار دادن ماده منبع استفاده می‌شوند معمولاً از جنس تنگستن یا مولیبدن هستند. فیلامان‌ها بایستی نقطه ذوب بالا داشته باشد و قابلیت حل شدن آن در ماده منبع پایین باشد تا با ماده منبع آلیاژ تشکیل ندهند. همچنین در برابر شوک‌های حرارتی مقاوم باشد. فیلامان‌ها در شکل‌های مختلفی مانند ورق و سیم‌های پیچیده شده که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شوند، ساخته می‌شوند [۹].



شکل ۱-۲: فیلامان‌ها و بوته‌های گوناگونی که در لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی به کار گرفته می‌شوند.

۳-۲ آماده‌سازی زیرلایه

پیش از انجام عمل لایه نشانی لازم است سطح زیرلایه از هر نوع آلودگی‌های سطحی پاک شود. فرایند تمیز سازی برای زیرلایه‌های شیشه‌ای شامل چند مرحله به شرح زیر است.

الف) شستشوی زیرلایه با آب مقطر.

ب) قرار دادن زیرلایه‌ها در محلول آب مقطر و جوشاندن به مدت ۱۰ دقیقه.

ج) تمیز کردن زیرلایه‌ها در محلول استون و الکل به مدت ۵ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک.

د) خشک کردن زیرلایه‌ها با سشوار.

۴-۲ عملیات لایه‌نشانی

برای تهیه نمونه‌های سه لایه‌ای Co/Cu/Co، از پودر کبالت با خلوص بالای ۹۹/۹٪، (محصول شرکت مرک آلمان) و پودر مس با خلوص بالای ۹۹/۹٪ به‌عنوان مواد اولیه استفاده شدند. به‌منظور تبخیر مواد، از بوتلهایی از جنس تنگستن و مولیبدن به ترتیب برای کبالت و مس استفاده شد. به دلیل اهمیت فصل مشترک لایه‌ها و جلوگیری از آلودگی، لایه‌ها باید بدون شکستن خلأ و تماس با هوای آزاد و به صورت متوالی لایه نشانی می‌شدند. به همین دلیل، هر سه بوتله را به‌طور همزمان در دستگاه قرار داده و از بوتله گردان برای چرخاندن بوتله‌ها استفاده کردیم که نمای دستگاه در شکل (۲-۲) آورده شده است. در این تحقیق زیرلایه‌ها در فاصله ۱۴/۸ سانتیمتر از منبع، در بالای آن قرار گرفتند. فاصله ضخامت‌سنج تا منبع نیز ۱۳/۵ سانتیمتر تنظیم شد، نانو لایه‌های سه‌تایی Co/Cu/Co، با ضخامت‌های متفاوت و شرایط دمایی اتاق و فشار 5×10^{-6} تور تهیه شدند. در این کار از دستگاه تبخیر در خلأ مدل ادوارد استفاده شده است که در شکل (۳-۲) تصویری از این دستگاه آورده شده است.



شکل ۲-۲: تصویر بوته گردان دستگاه تبخیر حرارتی.



شکل ۳-۲: دستگاه تبخیر حرارتی مستقر در آزمایشگاه نانو فیزیک دانشگاه شاهرود.

۵-۲ ضخامت‌سنجی

برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های انباشت شده، از بلور نوسانگر کوارتز ۶ مگاهرتز استفاده شد. به دلیل حساسیت فرکانس تشدید بلور کوارتز به دما، لوله خنک‌کننده آب سرد فنری شکل در تماس با آن تعبیه شده است. جهت تنظیمات ضخامت‌سنج، نسبت فاصله ضخامت‌سنج تا منبع به فاصله زیرلایه تا منبع، به عنوان یک ضریب ثابت، و چگالی ماده مورد نظر به دستگاه داده می‌شوند. بدین ترتیب، ضخامت لایه انباشت شده و آهنگ تبخیر، در حین انباشت قابل اندازه‌گیری است.

۶-۲ معرفی ادوات مشخصه‌یابی نمونه‌ها

۱-۶-۲ ریخت‌شناسی (مورفولوژی سطح)

برخلاف میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM)^۱ که منبع باریکه آن الکترون‌های گسیلی بر اثر گسیل گرما یونی از فیلامان با رشته تنگستنی حاصل می‌شود، در میکروسکپ‌های الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM)^۲ از یک میدان الکتریکی برای تولید پرتو الکترونی مبتنی بر پدیده تونل زنی استفاده می‌شود. اعمال یک میدان قوی بر سطح فلز سبب کاهش سد پتانسیل الکترون شده و احتمال پدیده تونل زنی از سطح فلز افزایش یافته و شار بزرگی از الکترون‌ها ایجاد می‌گردد. مقدار بار گسیل شده در این فرایند به بزرگی میدان الکتریکی اعمال شده بستگی دارد. معمولاً برای به دست آوردن بهره بیشتر برای تولید جریان الکترونی لازم است از فلزی با نوک بسیار تیز استفاده کرد و برای جلوگیری از اکسید شدن نوک به خلأ بسیار بالا نیاز است. الکترون‌های ایجاد شده را می‌توان به کمک میدان‌های مغناطیسی کانونی کرده و باریکه الکترونی مناسبی تولید کرد. در اثر برخورد باریکه الکترونی با ماده الکترون‌های ثانویه تولید

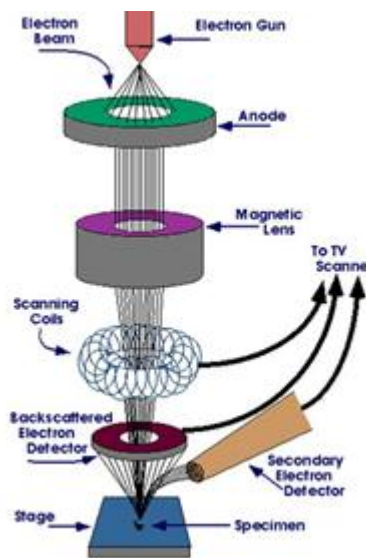
¹Scanning Electron Microscopy

²Field Effect Scanning Electron Microscopy

می‌شوند. علاوه بر الکترون‌های ثانویه الکترون‌های پس پراکنده شده نیز وجود دارند. پرتو الکترون‌های ثانویه که از نزدیکی سطح گسیل می‌شوند، حاوی اطلاعاتی از مشخصات سطحی یا توپوگرافی سطح نمونه است، در صورتی که پرتو الکترون‌های پس پراکنده حاوی اطلاعاتی در رابطه با ترکیب شیمیایی ماده می‌باشد [۱۰]. در آماده‌سازی نمونه غیر رسانا معمولاً سطح نمونه با لایه‌نازکی از کربن، طلا یا آلیاژ طلا پوشش داده می‌شود. علت این امر آن است که باید بین نمونه و پایه اتصال الکتریکی برقرار شود و نمونه‌های ریز نظیر پودرها باید روی یک فیلم رسانا پخش شده و کاملاً خشک شوند. نمونه‌ها باید عاری از مایعاتی با فشار بخار بالا مانند آب، محلول‌های پاک‌کننده آلی و لایه‌های روغنی باقی‌مانده باشند. شکل (۲-۴) نمایی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM; Hitschi S-4160) به همراه طرح شماتیک از آن را نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل ۲-۴: (الف) میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بکار گرفته شده در بررسی ساختاری نمونه‌های تهیه شده مستقر در دانشگاه تهران (ب) تصویر شماتیک از اجزاء داخلی مسیر عبور باریکه الکترونی تا سطح نمونه.

۲-۶-۲ مشخصه یابی ساختاری به کمک طیف پراش پرتو X'

در صورتی الکترون‌های وابسته به اتم‌های یک بلور توسط پرتو ایکس با نوسانات متناوب تحریک شوند، تعداد زیادی منابع نوری با فرکانس یکسان با پرتو فرودی شده، ایجاد می‌شود. موج‌های پراکنده شده با یکدیگر تداخل نموده و در صورتی که فاز بین دو پرتو متوالی مضرب درستی از 2π یا اختلاف راهشان مضرب درستی از طول موج باشد، بیشینه‌ی شدت حاصل می‌شود. بدین ترتیب نقاط تاریک و روشن به حاصل می‌شود. این نقاط روشن دارای شدت‌های مختلف می‌باشد که مقدار آن به عامل پراکندگی اتم‌ها یعنی به تعداد و توزیع الکترونی در اتم‌ها و به عامل ساختار که مربوط به پیکربندی یاخته اولیه است بستگی دارد [۱۱]. نمونه‌ها در محل مورد نظر قرار گرفته و پرتویی با خط تابش $CuK\alpha$ با طول موج $1/54$ آنگستروم به سطح نمونه فرود می‌آید. از آنجا که نگه‌دارنده نمونه قابل چرخش است تابش فرودی می‌تواند با زوایای مختلف سطح را جاروب کند. به کمک الگوی پراش به دست آمده می‌توان پارامترهای مهمی نظیر نوع ساختار بلوری (با توجه به موقعیت قله‌ها و مقایسه آن با کارت‌های استاندارد JCPDS^۲) و راستای ترجیحی رشد را تعیین کرد. شکل (۲-۵) نمونه‌ای از دستگاه پراش پرتو ایکس به کار گرفته شده در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد.

همچنین به کمک این داده‌ها می‌توان اندازه بلورکها، چگالی دررفتگی‌ها، کرنش، فاصله بین صفحات بلوری و ثابت شبکه‌ای ماده مورد نظر را محاسبه کرد. به‌منظور تعیین ثابت‌های شبکه‌ای یک بلور (بس‌بلور) لازم است از فاصله بین صفحات بلوری (d) اطلاع داشته باشیم. برای این مقصود می‌توان از قانون براگ (۲-۱) استفاده کرد [۱۱]:

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = n\lambda \quad (1-2)$$

¹X - ray diffraction

²Joint Committee of Powder Diffraction Society

در این رابطه d_{hkl} فاصله بین صفحات مجاور در راستای hkl ، d_{hkl} زاویه پراش، n مرتبه پراش و λ طول موج پرتو x است. اکنون با معلوم شدن d و با استفاده از رابطه (۲-۲) زیر برای ساختارهای شش گوشه و رابطه (۳-۲) برای ساختارهای مکعبی، ثابت‌های شبکه a و c را بدست آورد [۱۱]:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \left[\frac{h^2 + h k + k^2}{a^2} \right] + \frac{4}{3} \frac{l^2}{c^2} \quad (۲-۲)$$

$$d^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2 + l^2} \quad (۳-۲)$$

علاوه بر ثابت‌های شبکه‌ای می‌توان به کمک فرمول شرر (۴-۲) ابعاد بلورکها را به ازای هر قله پراش را پیدا کرد [۱۱]:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (۴-۲)$$

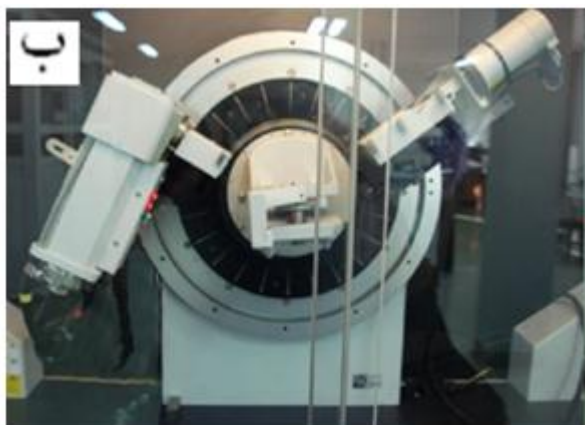
در این فرمول λ طول موج پرتو x و β تمام پهنا در نیمه بیشینه^۱ (FWHM) قله پراش در زاویه θ است.

میزان کرنش (ε) لایه و چگالی دررفتگی لایه‌ها به ترتیب با رابطه‌های (۵-۲) و (۶-۲) زیر محاسبه می‌شوند [۱۱].

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (۵-۲)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (۶-۲)$$

¹Full Width of Half Maximum



شکل ۲-۵: (الف) دستگاه پراش پرتو x مدل Bruker-AXS در دانشگاه دامغان و (ب) محل قرار گرفتن نمونه.

۲-۶-۳ مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش^۱ (VSM)

دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش در سال ۱۹۶۵ توسط سایمون فونر^۲ اختراع شد [۱]. از این دستگاه جهت اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ماده مغناطیسی استفاده می‌شود. رفتار مغناطیسی مواد مختلف دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، در شکل‌های پودری، لایه‌نازک، مایع، به کمک دستگاه VSM با رسم منحنی پسماند، قابل اندازه‌گیری است.

دستگاه VSM با تکیه بر آشکارسازی نیروی محرکه الکتریکی القا شده در پیچه، که بر پایه قانون القای فارادی رابطه (۷-۲) داده می‌شود، عمل می‌کند [۱۲]:

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} (B A \cos \theta) \quad (7-2)$$

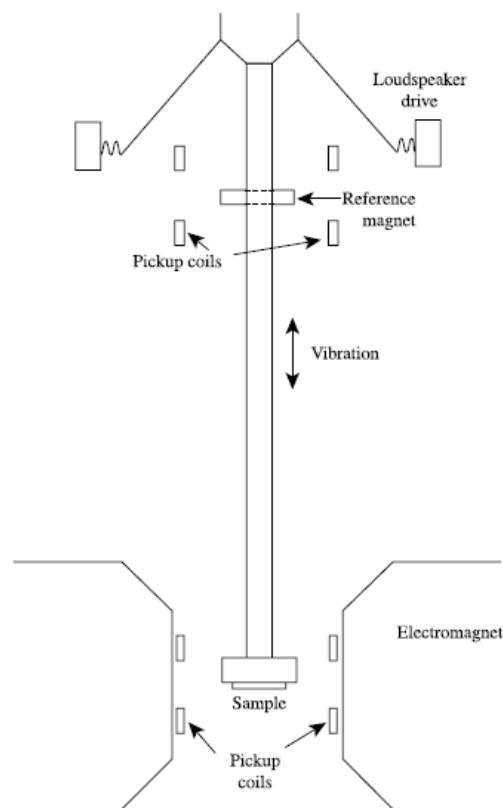
در این رابطه، N تعداد دور سیم در پیچه، A مساحت سطح مقطع پیچه، θ زاویه بین میدان

¹Vibrating Sample Magnetometer

²Simon Foner

مغناطیسی B و جهت عمود بر سطح مقطع پیچه است. در عمل، اگر سیستم بتواند با استفاده از یک نمونه معلوم کالیبره شود، اطلاع از این پارامترها ضروری نمی‌باشد [۱۲].

دستگاه VSM بر پایه تغییر شار در یک سیم‌پیچ به هنگام ارتعاش یک نمونه مغناطیده در نزدیکی آن کار می‌کند. نمونه معمولاً به شکل یک قرص کوچک بوده و به انتهای یک میله غیر مغناطیسی متصل می‌شود، انتهای دیگر آن به یک دیافراگم بلندگو یا نوع دیگری از مرتعش کننده مکانیکی ثابت شده است. میدان مغناطیسی نوسانی نمونه متحرک سبب القای یک نیرو محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های آشکارساز می‌شود که بزرگی آن متناسب با گشتاور مغناطیسی نمونه می‌باشد. نیرو محرکه القایی متناوب (کوچک) معمولاً به وسیله یک تقویت کننده قفل شونده که تنها در سیگنال‌های با بسامد ارتعاشی حساس است تقویت می‌شود [۱۲]. شکل (۶-۲) طرح‌واره‌ای از یک دستگاه VSM را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲: طرح‌واره‌ای از یک دستگاه VSM [۱].

۷-۲ اندازه‌گیری ناهمسانگردی

رفتار مغناطیسی مواد نانوبلوری، به‌طور مستقیم با ناهمسانگردی مغناطوبلوری آن‌ها مرتبط است. به منظور بررسی بهتر این خواص، ضروری است تا ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلوری مؤثر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شود. این مقادیر می‌توانند اطلاعاتی در مورد وجود ناهمسانگردی مغناطوبلوری در نمونه بدهند.

روش کلی برای به دست آوردن ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلوری مؤثر، قانون نزدیکی به اشباع^۱ است که در ادامه به توصیف آن می‌پردازیم.

۱-۷-۲ قانون نزدیکی به اشباع

قانون نزدیکی به اشباع در نمونه‌های مختلف متفاوت است، چرا که یک رابطه تجربی است. با این وجود معمول‌ترین شکل آن به صورت زیر است [۱۳]:

$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{H} - \frac{a_2}{H^2} - \frac{a_3}{H^3} \dots \right) + \chi H \quad (۸-۲)$$

در این رابطه، M مغناطش در میدان مغناطیسی H اعمال شده به نمونه، M_S مغناطش اشباع، a_1 و a_2 ضرایب ثابت و χ پذیرفتاری میدان بالاست که از افزایش مغناطش خودبه‌خودی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی حاصل می‌شود. بخش‌های اصلی معادله فوق، جملات $\frac{a_1}{H}$ و $\frac{a_2}{H^2}$ هستند. جمله اول ناشی از نقص‌های بلوری و جمله دوم به دلیل ناهمسانگردی بلوری به وجود آمده‌اند.

بدست آوردن ضرایب a_1 و a_2 ، از طریق برازش منحنی‌های تجربی، امکان‌پذیر است. اگرچه گاهی اوقات برازش، ضرایب نامعلومی را نتیجه می‌دهد. برای غلبه بر این مسئله، رابطه (۹-۲) به صورت زیر نیز

¹Law of approach to saturation

ارائه شده است [۱۳]:

$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{\sqrt{H}} - \frac{a_2}{H^2} - \frac{a_3}{H^3} \dots \right) + \chi H \quad (9-2)$$

برای مواد نانوبلوری مکعبی، ضریب a_2 که با ناهمسانگردی بلوری مرتبط است به صورت زیر به دست

می آید [۱۳]:

$$a_2 = \frac{8}{105} \left(\frac{k_{eff}^2}{M_S^2 \mu_0} \right) \quad (10-2)$$

با مشخص شدن ضریب a_2 ، مقادیر K_{eff} می تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$k_{eff} = \mu_0 M_S \left(\frac{105}{8} a_2 \right)^{1/2} \quad (11-2)$$

اگر منحنی های مغناطش، وابستگی $\frac{1}{\sqrt{H}}$ را برای یک بازه میدان و $\frac{1}{H^2}$ را برای بازه ای دیگر نشان

دهند، معادله (۹-۲) می تواند برای برازش داده های تجربی استفاده شود. با استخراج مقادیر a_2 و M_S از

برازش K_{eff} را می توان از معادله (۱۱-۲) به دست آورد.

۸-۲ اندازه گیری مقاومت مغناطیسی

اندازه گیری مقاومت مغناطیسی نمونه ها با استفاده از روش ون در پاو^۱ و در دمای اتاق انجام شده

است. در این روش نمونه با هر هندسه و شکلی در یک میدان مغناطیسی که موازی با سطح زیرلایه است

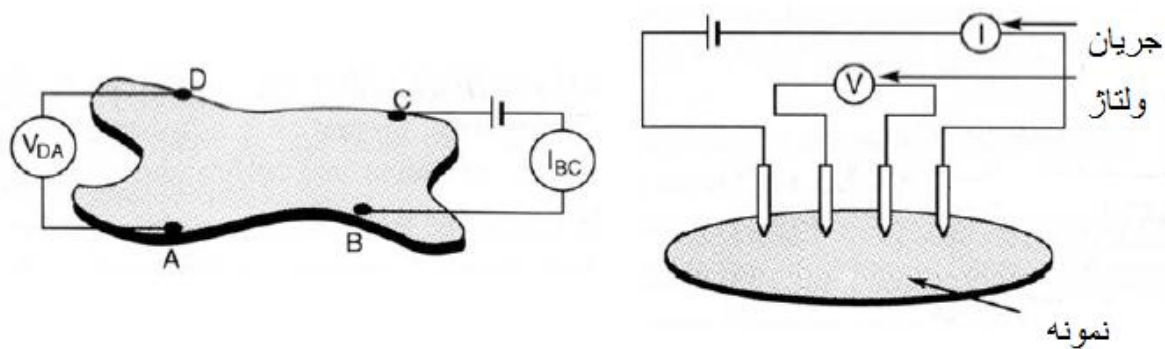
قرار داده می شود. در حضور این میدان به دو سر نمونه جریان و از دو سر دیگر مقدار و علامت ولتاژ به

دست می آید سپس با استفاده از قانون اهم مقاومت نمونه ها را محاسبه می کنیم. سپس با استفاده از رابطه

GMR تغییرات مقاومت الکتریکی را محاسبه میکنیم. نحوه قرار گرفتن اتصالات در شکل (۷-۲) نشان

داده شده است [۵].

¹Vander pauw



شکل ۷-۲: نحوه قرار گرفتن اتصالات بر روی نمونه [۵].

شکل (۸-۲) این سامانه و اجزای دستگاه استفاده شده برای اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲: دستگاه استفاده شده برای محاسبه مقاومت مغناطیسی در دانشگاه شاهرود.

۳ فصل سوم

مروری بر مطالعات انجام شده

امروزه چند لایه‌ای مغناطیسی^۱ متناوب شامل دو لایه فلزی فرومغناطیس (Ni, Fe, Co) که توسط یک لایه فلزی غیر مغناطیسی (Ru, Cu, Cr, Au) از هم جدا شده‌اند [۴] مورد توجه قرار گرفته‌اند.

برای تهیه این چند لایه‌ای‌های مغناطیسی می‌توان از روش‌هایی نظیر کندوپاش RF^۲، رو آراستی پرتو ملکولی^۳، الکتروانباشت پالسی^۴، الکتروانباشت^۵، لایه نشانی در خلأ بالا^۶ و سل_ژل^۷ استفاده نمود، که هر یک مزایا و معایب مربوط به خود را دارند [۴].

چند لایه‌ای‌های مغناطیسی به دلایل: الف) تغییرات GMR (مطالعات اخیر روی ساختارهای چند لایه‌ای احتمال رسیدن به GMR بیشتر از ۵۰٪ را نشان می‌دهند [۱۴])، ب) جفت‌شدگی تبادل، ج) ذخیره سازی مغناطیسی، د) تولید کننده باریکه‌های نوترونی تک انرژی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۶].

از میان چند لایه‌های مغناطیسی چند لایه‌ای‌های Co/Cu به دلیل نشان دادن اثر GMR بالاتر مورد توجه بیشتر قرار گرفته است [۶].

در این فصل، مروری بر مقالات و گزارش‌هایی که به بررسی خواص ساختاری، مغناطیسی و الکتریکی نانو ساختارهای چند لایه‌های Co/Cu پرداخته‌اند، خواهیم داشت.

¹Magnetic Multilayers

²RF sputtering method

³Molecular beam epitaxial

⁴Pulse control electrodeposition method

⁵Electrodeposition

⁶High vacuum deposition

⁷Sol-gel

۲-۳ بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu

در سال ۲۰۰۲ ساختارهای نانو لایه Co/Cu به روش الکتروانباشت پالسی، بر روی زیر لایه شیشه توسط یامادا^۱ و همکاران تهیه شدند و سپس خواص ساختاری و مغناطیسی این نانو لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات نمونه‌های بررسی شده در جدول (۱-۳) گزارش شده است [۱۵].

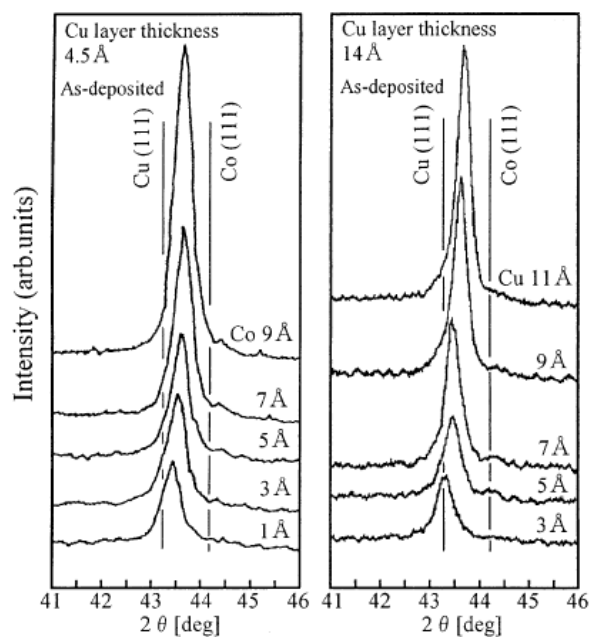
جدول ۱-۳: مشخصات لایه‌های انباشت شده با ضخامت مس ثابت [۱۵].

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ضخامت لایه کبالت ($\text{\AA}$)	۱	۳	۵	۷	۹	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
ضخامت لایه مس ($\text{\AA}$)	۴/۵	۴/۵	۴/۵	۴/۵	۴/۵	۳	۵	۷	۹	۱۱

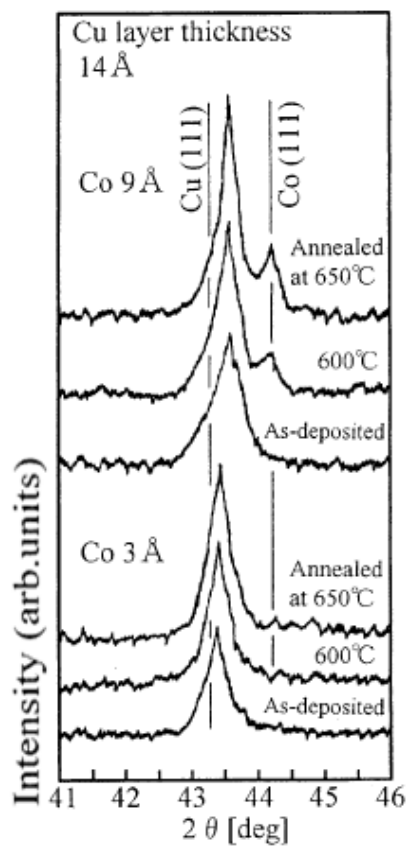
در شکل (۱-۳) الگوی‌های پراش پرتو ایکس نوعی مربوط به این نمونه‌ها نشان داده شده‌است. الگوی‌های پراش به دست آمده نشان دادند که با افزایش ضخامت کبالت قله متناظر اندکی به سمت زوایای بزرگ‌تر جابجا می‌شوند، و شدت قله‌ها نیز افزایش می‌یابند. عمل بازپخت بر روی نمونه‌های ۶ و ۹ در دمای ۶۰۰ و ۶۵۰ درجه سانتی گراد انجام شد و الگوهای پراش اندازه‌گیری شده از آنها در شکل (۲-۳) گزارش شده‌است. الگوی پراش اندازه‌گیری شده نشان دادند که با انجام عمل بازپخت^۲ لایه Co/Cu به دو فاز جدا از هم کبالت و مس با ساختار FCC تبدیل می‌شوند، بنابراین در ساختار چند لایه Co/Cu تولید شده به روش الکتروانباشت فازهای کبالت و مس در یک ترکیب واحد از هم جدا هستند.

^۱A. Yamada

^۲Annealing

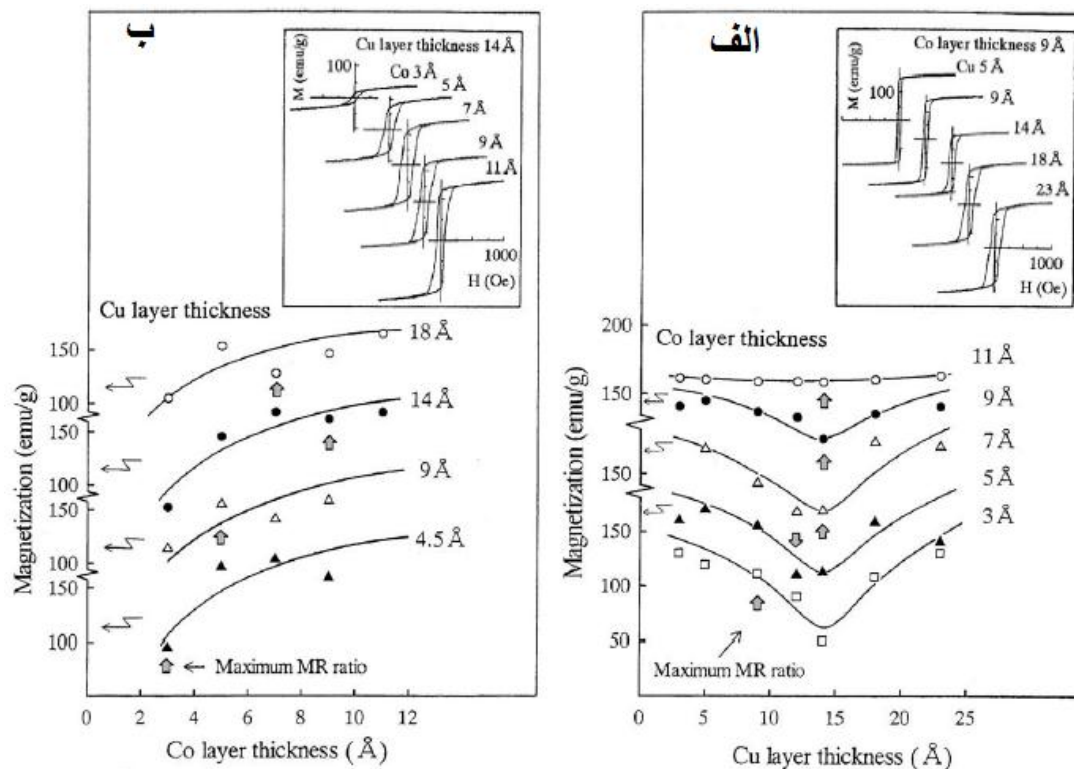


شکل ۳-۱: طیف‌های XRD نمونه‌های چند لایه‌ای Co/Cu تهیه شده [۱۵].



شکل ۳-۲: طیف‌های XRD بدست آمده از نمونه‌های Co/Cu ۶ و ۹ [۱۵].

مغناطش (M) نمونه‌ها بر حسب شدت میدان مغناطیسی اعمالی (H)، با اعمال یک میدان مغناطیسی موازی با سطح لایه اندازه‌گیری شدند. حلقه‌های پسماند اندازه‌گیری شده برای این نمونه‌ها و منحنی‌های مربوط به مغناطش برحسب ضخامت لایه مس و لایه کبالت، در شکل (۳-۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۳: حلقه‌های پسماند نمونه‌ها، وابستگی مغناطش به (الف) ضخامت لایه مس، (ب) ضخامت لایه کبالت [۱۵].

بررسی نتایج گزارش شده در شکل (۳-۳) نشان داد که در نمونه‌های شکل (الف) با افزایش ضخامت لایه مس تا 14 Å مقدار مغناطش کاهش می‌یابد و سپس از 14 Å تا 25 Å افزایش می‌یابد، این بررسی نشان می‌دهد که هرچه ضخامت کبالت کمتر باشد مقدار مغناطش نیز کوچک‌تر خواهد بود، کمترین مقدار مغناطش مربوط به ضخامت لایه مس برابر 14 Å و ضخامت کبالت 3 Å است، و در

نمونه‌های شکل (ب) با افزایش ضخامت لایه‌های کبالت مقدار مغناطش افزایش می‌یابد [۱۵].

در سال ۲۰۰۴ سه لایه‌ای‌های مغناطیسی Co/Cu/Co، تهیه شده به روش کندوپاش بر روی زیر لایه سیلیکون توسط گروه آدیه یه^۱ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. مشخصات این نمونه‌ها در جدول (۲-۳) آمده است.

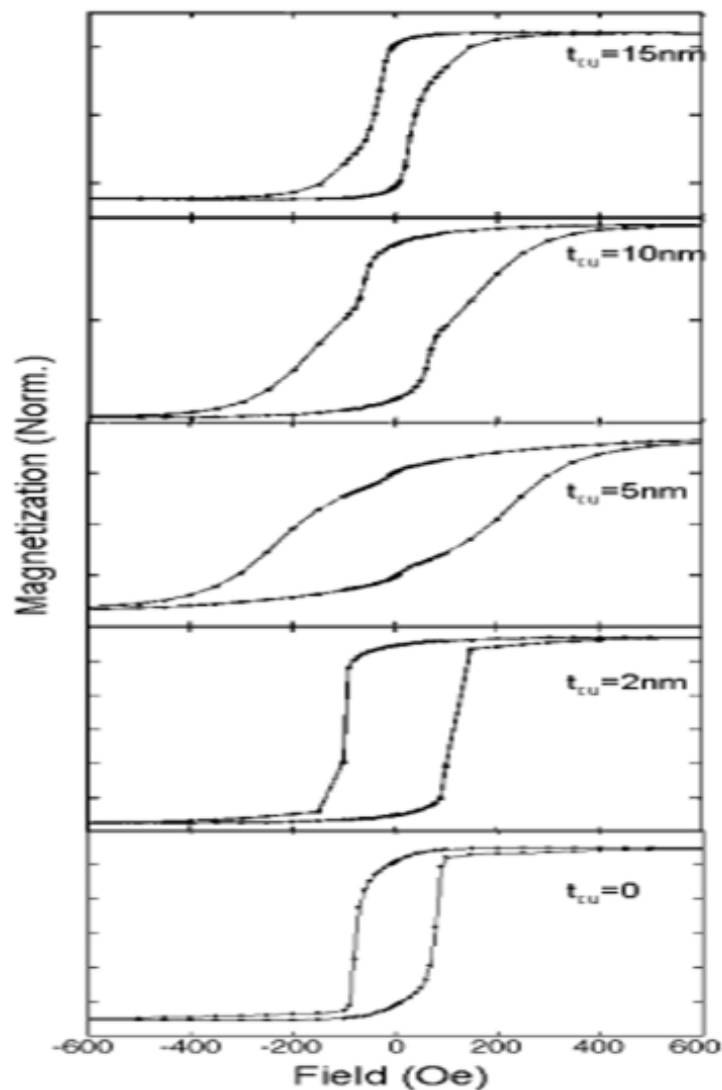
جدول ۲-۳: مشخصات نمونه‌های رشد داده شده [۱۶].

نام نمونه	ضخامت لایه کبالت (nm)	ضخامت لایه مس (nm)	ضخامت لایه کبالت (nm)
۱	۱۰	۰	۱۰
۲	۱۰	۲	۱۰
۳	۱۰	۵	۱۰
۴	۱۰	۱۰	۱۰
۵	۱۰	۱۵	۱۰

بررسی خواص مغناطیسی این نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی VSM انجام شد. شکل (۳-۴) حلقه‌های پسماند نمونه‌ها را برحسب تابعی از ضخامت لایه جداساز مس نشان می‌دهد. بررسی حلقه‌های پسماند نشان داد که خواص مغناطیسی نمونه‌ها، به‌طور قابل توجهی به ضخامت لایه مس وابسته است. رفتار این حلقه‌ها با استفاده از نوع جفت‌شدگی بین لایه‌های کبالت مجاور توضیح داده شده است. برای ضخامت کمتر مس (۲ نانومتر)، جفت‌شدگی تبادلی مستقیم بین لایه‌های کبالت، در مقایسه با جفت‌شدگی تبادلی بین لایه‌ای غیرمستقیم قوی‌تر است. این نشان می‌دهد که گشتاورهای مغناطیسی لایه کبالت در میدان‌های کوچک به صورت موازی جهت‌گیری کرده و مکانیسم جفت‌شدگی،

¹A. O. Adeyeye

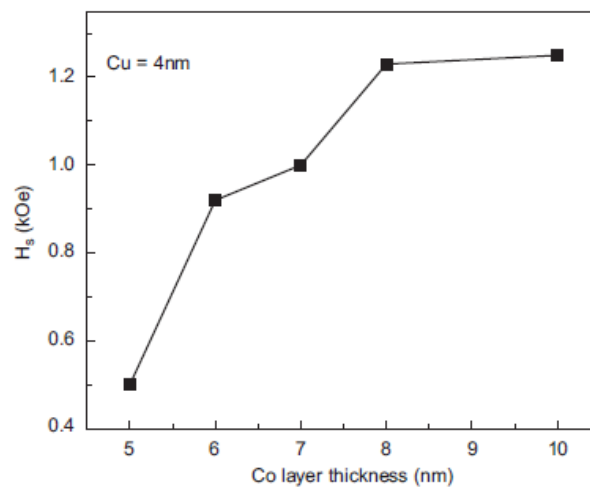
فرومغناطیس است. برای ضخامت بیشتر لایه مس (۵ نانومتر)، هر چند جفت‌شدگی تبادلی مستقیم بین لایه‌های کبالت ضعیف است، اما جفت‌شدگی تبادلی غیرمستقیم بین این لایه‌ها با لایه جداساز مس قوی بوده و به پایداری جهت‌گیری پادموازی نسبی لایه‌های کبالت در میدان‌های کوچک کمک می‌کند. همچنان که ضخامت لایه مس افزایش می‌یابد، دو لایه‌ای‌های تشکیل شده از لایه کبالت، با ضخامت لایه کبالت ۱۰ نانومتر، به صورت تبادلی جفت می‌شوند. کاهش میدان وادارندگی، با افزایش ضخامت لایه مس، به وابستگی ضخامت لایه کبالت به وادارندگی نسبت داده شده است.



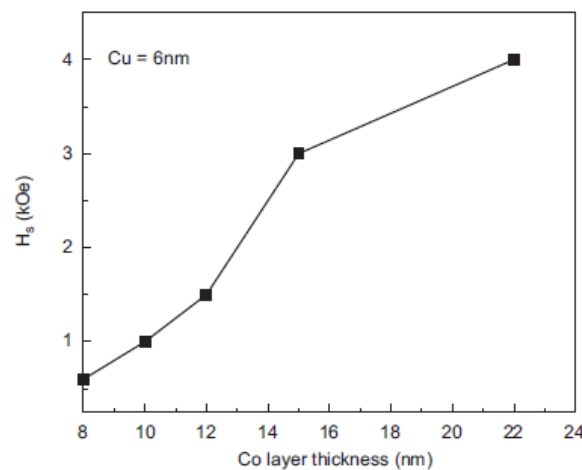
شکل ۳-۴: حلقه‌های M-H نمونه‌های $(\text{Co/Cu/Co})_2$ برای ضخامت‌های مختلف لایه مس [۱۶].

در سال ۲۰۰۹ پانديا^۱ و همکارانش خواص مغناطیسی و اثر ضخامت لایه‌های Co و Cu بر مقاومت مغناطیسی بزرگ در دو لایه‌ای‌های Co/Cu با تکرار ۵۰ بار ($n = 50$) که به روش الکترو انباشت تهیه شدند را بررسی کردند [۱۷].

الف



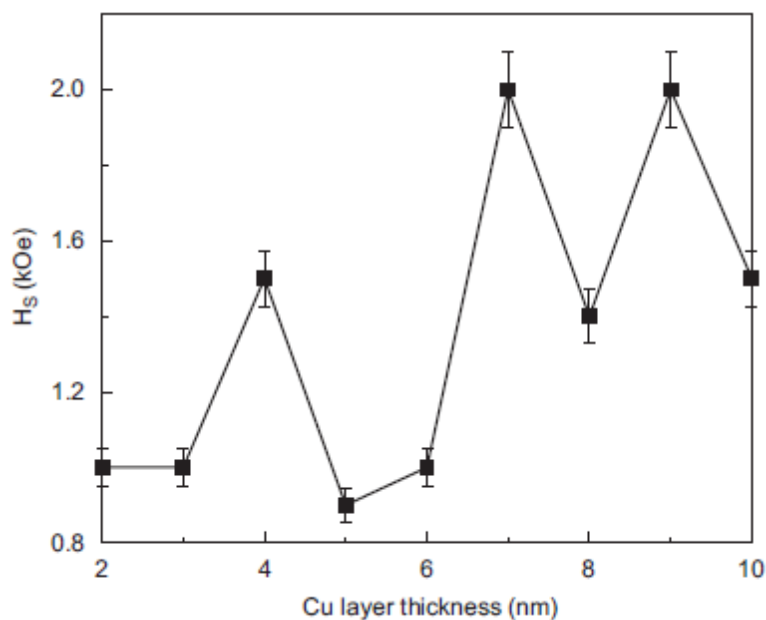
ب



شکل ۳-۵: تغییرات مقادیر میدان اشباع برای هر دو گروه الف) ضخامت لایه مس ۴ نانومتر و ضخامت لایه کبالت ۱۰ - ۵ نانومتر، ب) ضخامت لایه مس ۶ نانومتر و ضخامت کبالت ۲۲ - ۸ نانومتر [۱۷].

¹D. K. Pandya

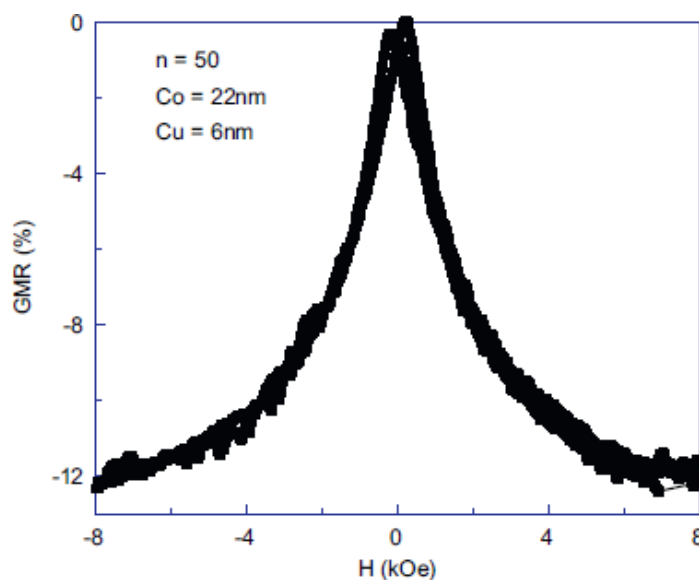
وابستگی میدان اشباع به ضخامت لایه کبالت برای دو نمونه ضخامت‌های مس ۴، ۶ نانومتر در شکل (۳-۵) رسم شده‌اند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه کبالت میدان اشباع افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های گروه الف (ضخامت کبالت ۱۰-۵ نانومتر و ضخامت مس ۴ نانومتر) میدان اشباع در محدوده ۰/۵-۱/۲ کیلو اورستد است، در حالی که برای نمونه‌های گروه ب (ضخامت کبالت ۲۲-۸ نانومتر و ضخامت مس ۶ نانومتر) مقدار میدان اشباع بیشتر از ۱ KOe است و با افزایش ضخامت لایه کبالت میدان اشباع افزایش می‌یابد. وابستگی میدان اشباع به ضخامت لایه مس در شکل (۳-۶) رسم شده است. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه مس مقادیر میدان اشباع نوسانی است که به نوسانات GMR شکل (۳-۹) وابسته است. دلیل رفتار نوساناتی در مقادیر میدان اشباع را به جفت شدگی پاد فرومغناطیس و فرومغناطیس نسبت داده‌اند.



شکل ۳-۶: تغییرات مقادیر میدان اشباع با ضخامت لایه مس برای حالت $n=50$ [۱۷].

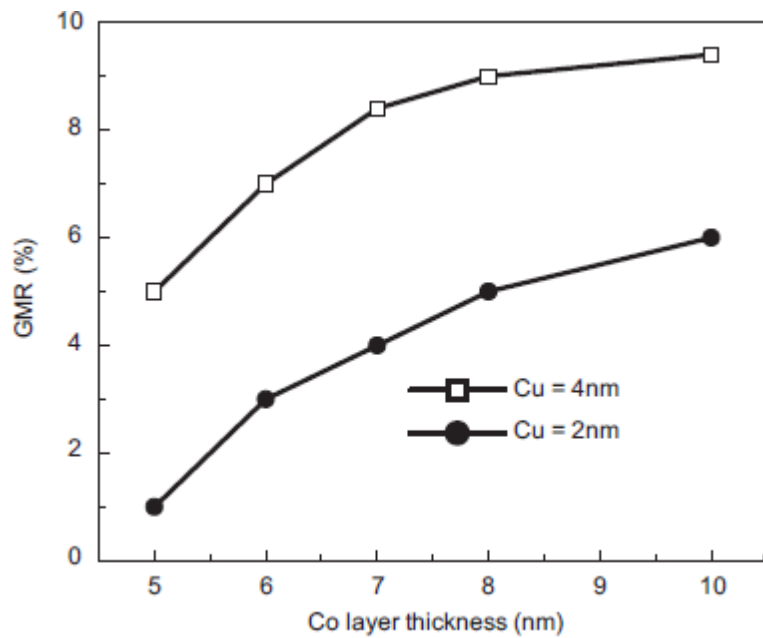
در شکل (۷-۳) مقاومت مغناطیسی به دست آمده برحسب میدان اعمالی برای نمونه با ضخامت

لایه کبالت $t_{Co} = 22 \text{ nm}$ ، $t_{Cu} = 6 \text{ nm}$ و $n = 50$ نشان داده شده است.

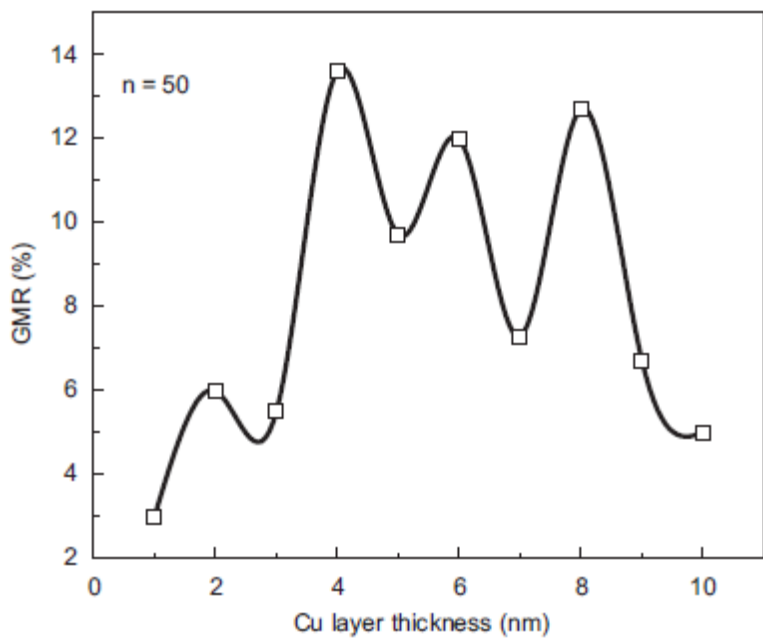


شکل ۷-۳: تغییرات مقادیر میدان مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی برای حالت $n = 50$ با زیر لایه ITO [۱۷].

اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی در محدوده میدان مغناطیسی از -8 Oe تا 8 Oe اندازه‌گیری شده است. مقدار GMR گزارش شده در این نمونه $12/6 \%$ است. در شکل (۸-۳) تغییرات مقاومت مغناطیسی برحسب ضخامت لایه مس و کبالت نشان داده شده است. وابستگی مقاومت مغناطیسی بزرگ به ضخامت لایه مس ($10-1 \text{ nm}$) برای چند لایه‌ای‌های Co/Cu توسط گروه پاندا و همکاران بررسی شده، و در شکل (۹-۳) نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که وقتی ضخامت لایه مس بین مقادیر $4-8 \text{ nm}$ باشد، مقاومت مغناطیسی بزرگ دارای بیشترین مقادیر (حدود $12-14 \%$) بوده و با افزایش ضخامت لایه مس از مقدار 8 تا 10 nm مقدار آن کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار به جفت‌شدگی آنتی فرومغناطیس و فرومغناطیس نسبت داده شده است.

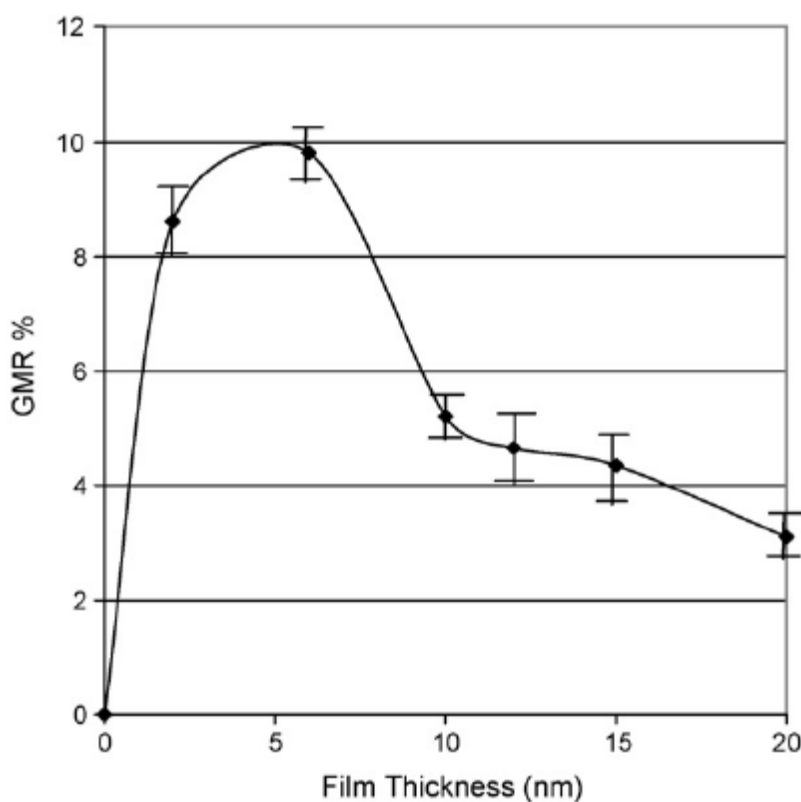


شکل ۳-۸: تغییرات مقادیر مقاومت مغناطیسی با ضخامت لایه کبالت برای دو حالت ضخامت مس ۲ و ۴ نانومتر برای حالت $n = 50$ [۱۷].



شکل ۳-۹: تغییرات مقادیر مقاومت مغناطیسی بزرگ با ضخامت لایه مس برای حالت $n = 50$ [۱۷].

در سال ۲۰۰۶ ساکرانی^۱ و همکاران مقاومت مغناطیسی بزرگ را برای نانو لایه‌های Co/Cu/Co که بر روی زیر لایه شیشه به روش کندوپاش RF تهیه شدند، مطالعه نمودند [۱۴]. نتایج حاصل از اندازه‌گیری GMR به ازای ضخامت‌های مختلف لایه کبالت در شکل (۳-۱۰) گزارش شده‌است.



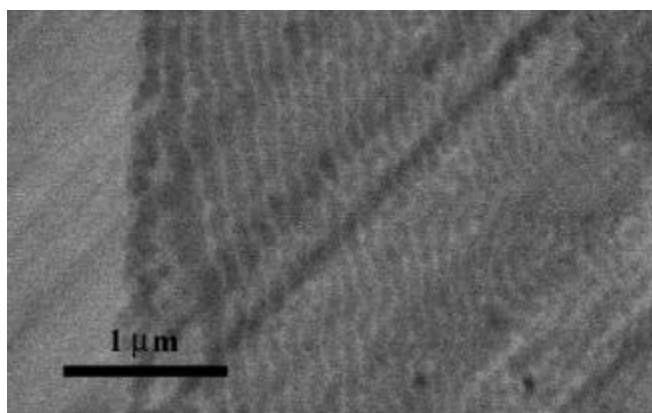
شکل ۳-۱۰: منحنی تغییرات GMR برحسب ضخامت لایه کبالت [۱۴].

نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش ضخامت کبالت از ۲ تا ۶ نانومتر مقدار GMR تا حدود ۱۰٪ افزایش و سپس با افزایش ضخامت تا ۲۰ نانومتر این مقدار به تدریج کاهش می‌یابد. تغییرات GMR ناشی از افزایش ضخامت کبالت از ۲ تا ۶ نانومتر که به دلیل افزایش میزان اسپین‌های فرومغناطیس در لایه‌های فرومغناطیس می‌باشد، از برهم‌کنش تبدالی فرومغناطیس ناشی می‌شود. افزایش ضخامت لایه

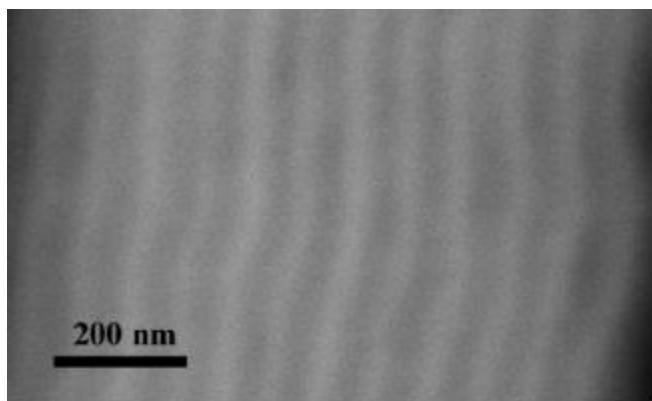
کبالت، باعث افزایش میانگین ذرات کبالت نیز می‌شود. کاهش GMR در ضخامت‌های بزرگ‌تر ناشی از برهم‌کنش‌های پاد فرومغناطیس بین لایه‌های کبالت مجاور لایه مس است.

در سال ۲۰۰۲ گمز^۱ و همکارانش به بررسی خواص ساختاری نانو لایه‌های Co/Cu که بر روی زیر لایه‌های Si/Seed و glass/ITO به روش الکتروانداخت تهیه شدند را بررسی کردند [۱۸].

الف



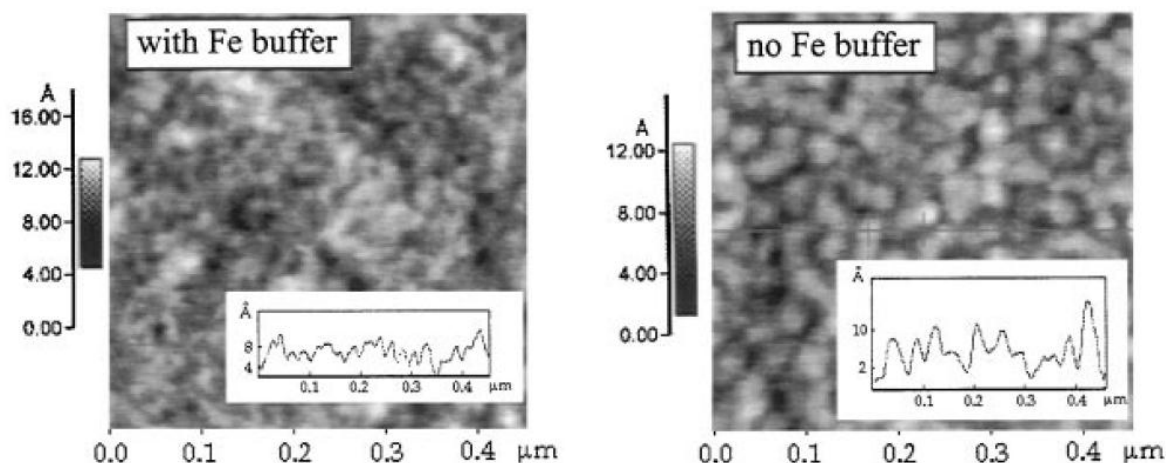
ب



شکل ۳-۱۱: تصاویر SEM چند لایه‌ای‌های Co/Cu (الف) در مقیاس ۱ μm، (ب) در مقیاس ۲۰۰ nm [۱۸].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح نمونه‌ها در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده‌است. ساختار Co/Cu در نمونه (الف) دارای ضخامت ۱۸۰ نانومتر و برای نمونه (ب) دارای ضخامت ۷۰ نانومتر است. اگرچه افزایش مدت زمان پالس منجر به زبری سطح نمونه‌ها می‌شود اما ضخامت لایه‌ها نیز به مدت زمان پالس وابسته است.

در سال ۱۹۹۹ لنگر^۱ و همکارانش به بررسی خواص سطحی نانو لایه‌های Co/Cu بر روی زیر لایه‌های بافر آهن و بدون بافر آهن به روش کندوپاش تهیه شدند پرداختند [۱۹]. به منظور بررسی توپوگرافی سطح لایه‌ها، تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ (AFM) از سطح نمونه‌ها ثبت شده است که در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است.



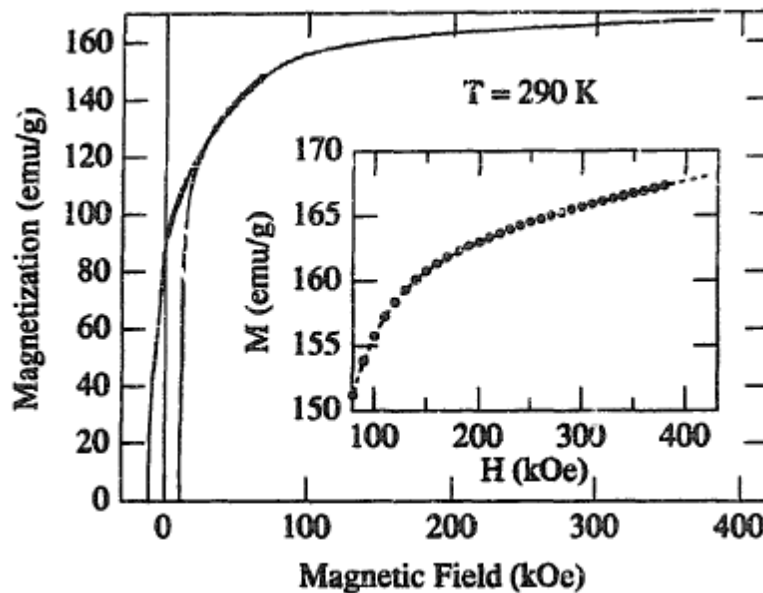
شکل ۳-۱۲: تصاویر سطحی و خطی میکروسکوپ نیروی اتمی. تصاویر خطی با مقیاس یکسان از توپولوژی سطح متفاوت از دو نمونه چند لایه‌ای Co/Cu [۱۹].

بررسی تصاویر نشان داد که نمونه‌ی با بافر آهن در مقایسه با نمونه‌ای که به‌طور مستقیم روی زیر لایه رشد داده شده دارای سطح صاف‌تری است.

^۱J. Langer

^۲Atomic Force Microscopy

آندریف^۱ و همکارانش ابتدا نوارهای Nd-Fe-B را با استفاده از روش گداخت القایی تهیه کردند [۲۰] و سپس رفتار مغناطش آنها را بررسی نمودند. شکل (۳-۱۳) منحنی‌های مغناطش و مغناطش زدایی نمونه پودر همسانگرد نوارهای ساخته شده Nd-Fe-B که در دمای ۲۹۰° K و تا میدان مغناطیسی در حدود ۴۰۰ کیلو اورستد اندازه‌گیری شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳: منحنی مغناطش نوارهای Nd-Fe-B بر حسب میدان مغناطیسی شکل ضمیمه منحنی مغناطش تجربی (نقطه) و محاسبه شده از رابطه (۳-۱) (خط) را نشان می‌دهد [۲۰].

مغناطش یک فرومغناطیس در یک ناحیه باریکی حول اشباع، با فرایند چرخش به اندازه زاویه کوچکی بین مغناطش و میدان اعمال شده، به اشباع نزدیک می‌شود. فرایند چرخش می‌تواند با استفاده از قانون نزدیکی به اشباع معادله (۳-۱) توصیف می‌شود:

$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{H} - \frac{a_2}{H^2} - \frac{a_3}{H^3} \dots \right) + \chi H \quad (3-1)$$

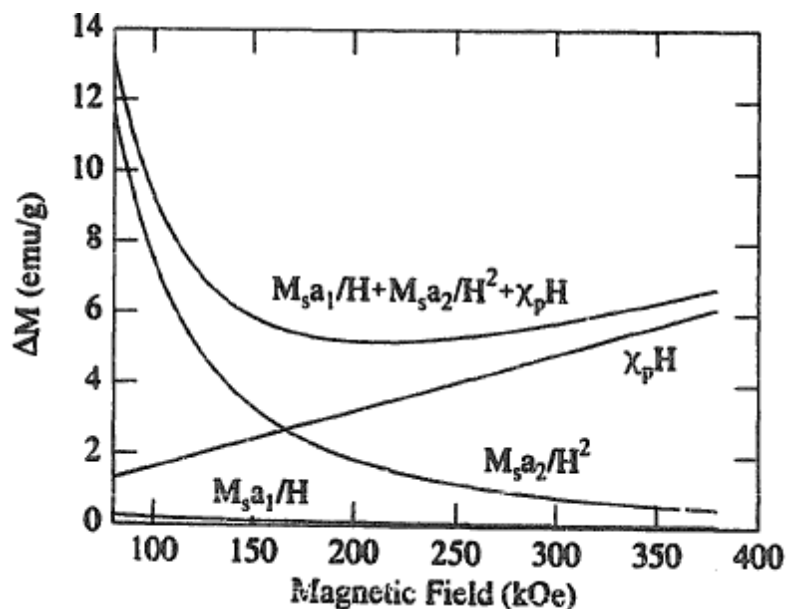
¹ S. V. Andreev

که در این رابطه M مغناطش اشباع، a_1 و a_2 ضرایب ثابت و χ_{hf} پذیرفتاری در میدان بالا است.

بهترین برازش منحنی مغناطش با مقادیر $M_S = 161/8 \frac{\text{emu}}{\text{gr}}$ ، $a_1 = 1/2 \times 10^2 \text{ Oe}$ ، $a_2 = 4/6 \times 10^4 \text{ Oe}$ و

$\chi_{hf} = 1/6 \times 10^{-5} \text{ Oe}$ در میدان بالاتر از ۸۰ کیلو اورستد بدست آمده است. سه جمله $(M_S \frac{a_1}{H})$ ، $M_S(\frac{a_2}{H^2})$ و

χ_{hf} و مجموع آنها ΔM در شکل (۳-۱۴) رسم شده است.



شکل ۳-۱۴: سهم جملات $(M_S \frac{a_1}{H})$ ، $M_S(\frac{a_2}{H^2})$ و χ_{hf} و مجموع آنها در رابطه (۳-۱) برای منحنی مغناطش [۲۰].

از مقادیر $(M_S \frac{a_1}{H})$ ، $M_S(\frac{a_2}{H^2})$ و χ_{hf} نشان دادند که مغناطش خودبه خودی ترکیب Nd-Fe-B که با

یک نمونه تک بلور تخمین زده شده، در دمای اتاق، ۱۷۴ emu/gr می باشد. این نشان می دهد که نوارهای

Nd-Fe-B حدود ۷٪ فاز غیر مغناطیسی دارد. جمله $(M_S \frac{a_1}{H})$ ، با ناهمسانگردی موضعی ناشی از نقص های

ساختاری و محتوای غیر مغناطیسی مرتبط است که توزیع غیر یکنواخت جهت مغناطش موضعی را نشان

می دهد. در ترکیبات با ناهمسانگردی بالا، a_1 باید خیلی کوچک تر از a_2 باشد. جمله $M_S(\frac{a_2}{H^2})$ ناشی از

چرخش مغناطش ناهمسانگردی مغناطوبلوری است. این جمله در بازه میدان ۸۰-۱۵۰ کیلو اورستد غالب

است و مغناطش در این بازه با رابطه (۳-۲) توصیف می شود.

$$M = M_S \left(1 - \frac{a_2}{H^2} \right) \quad (2-3)$$

با توجه به نتایج بدست آمده مقادیر $M_S = 163/9 \frac{\text{emu}}{\text{gr}}$ و $a_2 = 4/8 \times 10^{-5} \text{Oe}^2$ می باشد.
 مقادیر بدست آمده برای $\chi_{\text{hf}} \left(10^{-5} \frac{\text{emu}}{\text{gr-Oe}} \right)$ با مقادیر به دست آمده از منحنی مغناطش تک بلور Nd-Fe-B در میدان بالای ۲۰۰ کیلو اورستد در امتداد محور آسان [۰۰۱]، مطابقت دارد [۲۰].

۴ فصل چهارم

مشخصه‌یابی نانولایه‌های نازک Co/Cu/Co

۱-۴ مقدمه

در این فصل به بررسی، خواص ساختاری و مغناطیسی نانولایه‌های Co/Cu/Co تهیه شده به روش تبخیر حرارتی پرداخته‌ایم. سپس تأثیر دو پارامتر ضخامت لایه کبالت و ضخامت لایه مس بر خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده بررسی شده است. در بخش (۲-۴) اثر تغییر ضخامت لایه‌های کبالت با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه مس و در بخش (۳-۴) اثر تغییر ضخامت لایه مس با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت مورد مطالعه قرار دادیم.

۲-۴ بررسی اثر تغییر ضخامت لایه‌های کبالت بر خواص ساختاری و مغناطیسی

چندلایه‌ای Co/Cu/Co

به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه کبالت بر خواص فیزیکی نانولایه‌های Co/Cu/Co، عملیات لایه نشانی برای تهیه نمونه با ضخامت‌های مختلف لایه کبالت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نانومتر و ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر بر روی زیر لایه شیشه‌ای انجام شد. مشخصات نمونه‌های رشد داده شده در جدول (۱-۴) گزارش شده است.

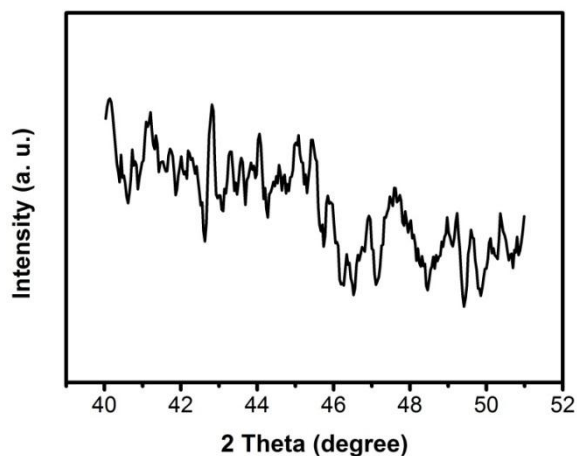
جدول ۱-۴: مشخصات نمونه‌های تهیه شده با ضخامت لایه مس ثابت و ضخامت لایه‌های کبالت متغیر.

نمونه	ضخامت لایه کبالت (nm)	ضخامت لایه مس (nm)	ضخامت لایه کبالت (nm)
۱	۱۵	۱۵	۱۵
۲	۳۰	۱۵	۳۰
۳	۴۵	۱۵	۴۵

چون خواص ساختاری و مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu/Co تابع پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت لایه مغناطیسی کبالت می‌باشد لذا در این بخش به مطالعه اثر تغییر ضخامت لایه‌های کبالت پرداخته‌ایم.

۴-۲-۱ خواص ساختاری

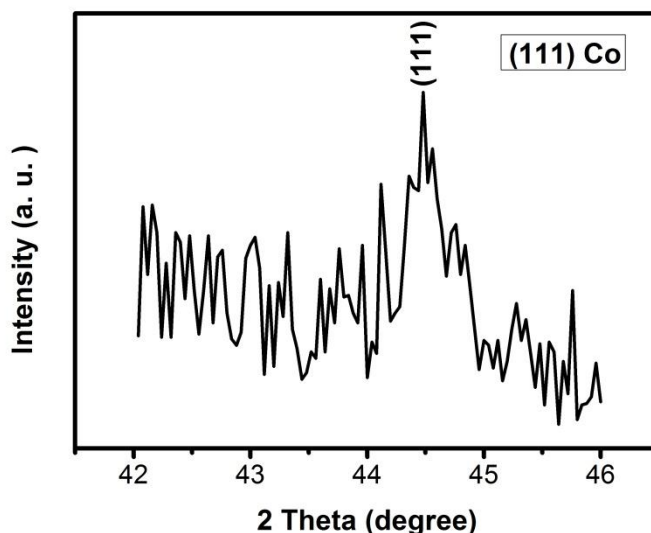
نمودار طرح پراش اشعه X نمونه ۳ در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: طیف XRD نمونه Co(۴۵ nm)/Cu(۱۵ nm)/Co(۴۵ nm) تهیه شده به روش تبخیر حرارتی.

اندازه‌گیری طیف‌های XRD نمونه‌های رشد داده شده شامل هیچ قله پراش از صفحات هم‌راستا که نشانگر تشکیل یک ساختار بلوری باشد نبودند که می‌تواند به دلیل ضخامت کم چند لایه‌ای ها باشد. به همین دلیل یک چندلایه‌ای با ضخامت کبالت بیشتر (۶۰ nm) تهیه و سپس طیف XRD آن اندازه‌گیری شد. الگوی پراش اشعه X اندازه‌گیری شده برای این نمونه در شکل (۴-۲) نشان داده شده‌است. لازم به‌ذکر است که مطالعه خواص ساختاری چند لایه‌ای‌های با ضخامت کم با دستگاه‌های پراش اشعه X

معمولی دشوار می‌باشد و معمولاً از دستگاه‌هایی که قادر به ثبت طرح پراش در زوایای خیلی کم هستند استفاده می‌شود.



شکل ۴-۲: طیف XRD نمونه $\text{Co}(60 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(60 \text{ nm})$ تهیه شده به روش تبخیر حرارتی.

همانگونه که در این شکل دیده می‌شود طیف پراش پرتوی X این نمونه شامل فقط قله پراش از صفحات (۱۱۱) در محدوده زاویه $44/49^\circ$ درجه مربوط به ساختار مکعبی مرکز وجهی کبالت می‌باشد. این نتیجه با نتایج بدست آمده توسط گروه یامادا و همکاران که خواص ساختاری نانو لایه‌های Co/Cu را بررسی کرده‌اند مطابقت دارد [۱۵]. با استفاده از این داده‌ها و رابطه (۲-۴) می‌توان اندازه بلورک‌ها (D)، رادر این نمونه بدست آورد. نتیجه این محاسبات در جدول (۲-۴) گزارش شده‌است. این نتیجه با مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری طیف XRD نمونه $\text{Cu}_{50} \text{ A} [\text{Co}_{12} \text{ A} - \text{Cu}_{26} \text{ A}]_{15}$ که توسط گروه جن-فرانکوئیس بوبو^۱ به روش کندوپاش Rf بر روی زیر لایه شیشه تهیه شده‌اند در توافق می‌باشد [۲۱]. این گروه نیز ابعاد بلورک‌ها را برای ساختار مکعبی مرکز وجهی کبالت حدود ۲۰ نانومتر بدست آورده‌اند.

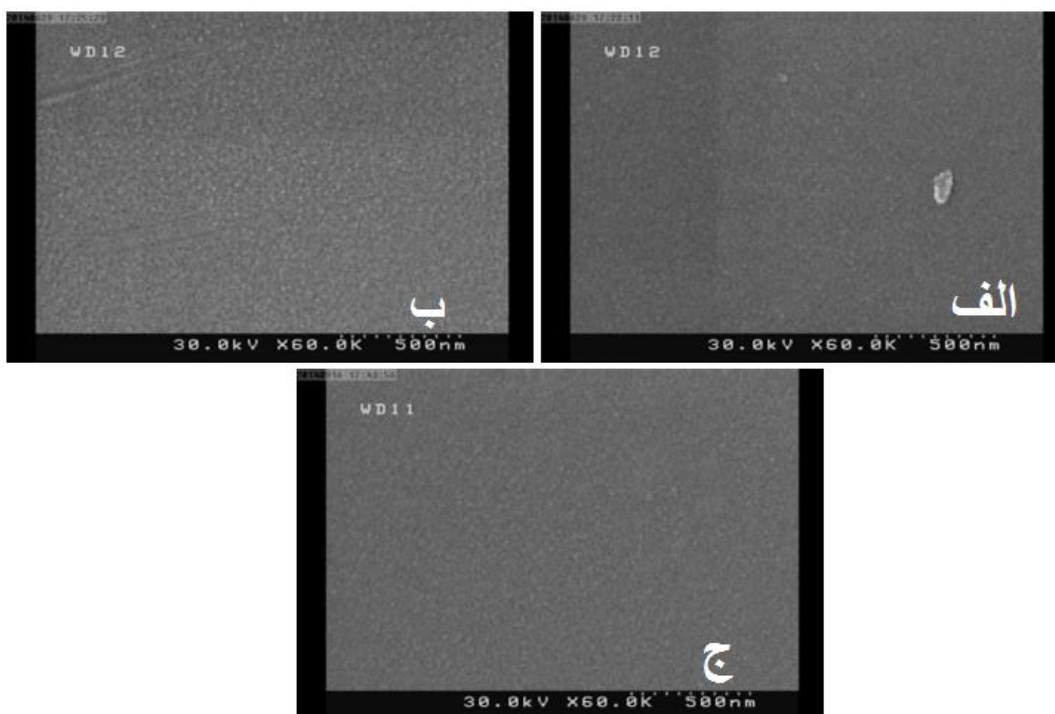
¹ Jean – Francois Bobo

جدول ۲-۴: نتایج بدست آمده از داده‌های طیف XRD مربوط به نمونه Co(۶۰ nm)/Cu(۱۵ nm)/Co(۶۰ nm).

FWHM	اندازه بلورکها D(nm)	فاصله صفحات d (Å°)	ثابت شبکه (Å°)
۰/۴۶۶	۱۷	۲/۰۳۴۷۷	۳/۵۴۴۷

۲-۲-۴ ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها

نمونه‌ای از تصاویر FESEM ثبت شده از سطح نمونه‌های تهیه شده در مقیاس ۵۰۰ نانومتر در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.

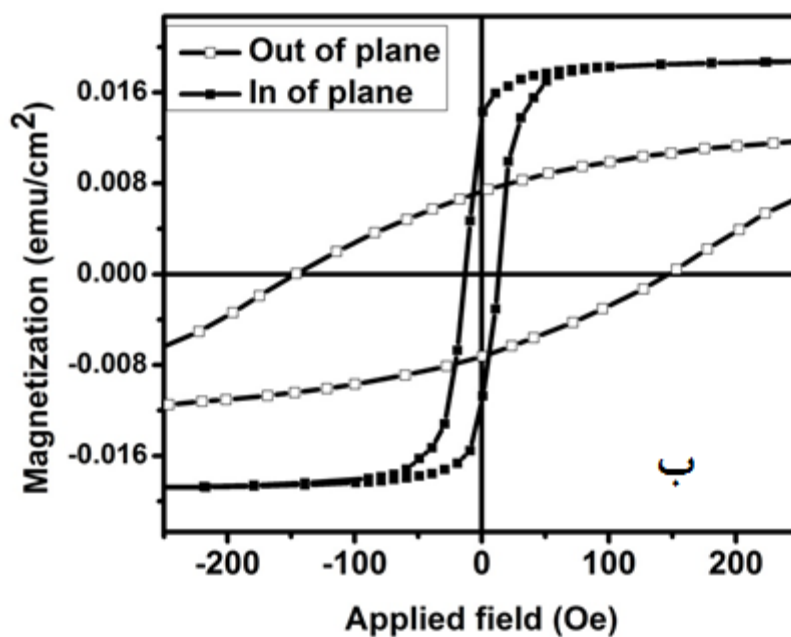
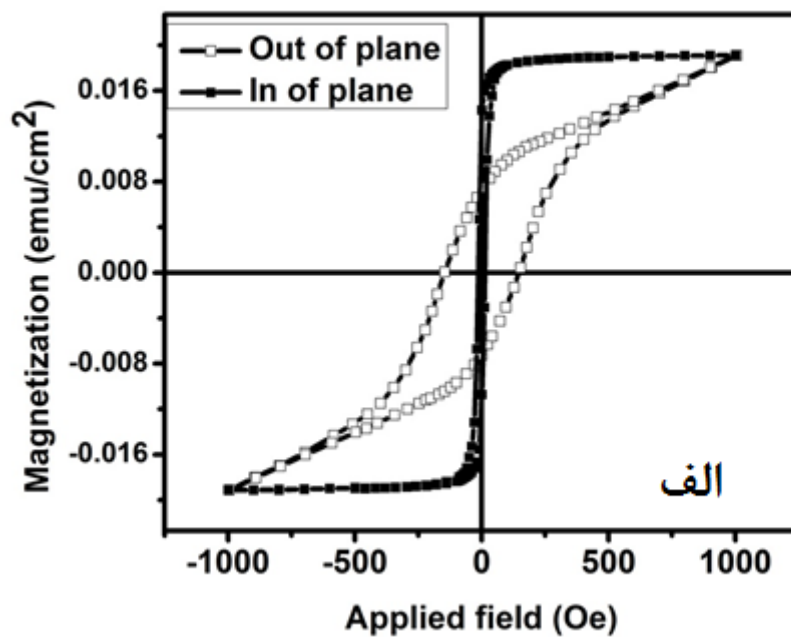


شکل ۳-۴: تصاویر FESEM از سطح لایه‌های Co/Cu/Co با ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌ها کبالت متغیر، الف (۱۵، ب) ۳۰ و ج) ۴۵ نانومتر.

همانگونه که در این تصاویر دیده می‌شود با تغییر ضخامت لایه‌های کبالت ساختار سطح نمونه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. تمام نمونه‌ها دارای ساختار دانه‌ای، یکنواخت، متراکم و منسجم می‌باشند. اگر چه با افزایش ضخامت لایه کبالت حضور دانه‌هایی با ابعاد میانگین حدود ۲۵ nm که تقریباً به طور یکنواخت در سراسر سطح لایه توزیع شده‌اند مشهودتر می‌باشد.

۴-۲-۳ خواص مغناطیسی

به منظور بررسی خواص مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu/Co، ابتدا نمونه شماره ۳ (ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر و ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر) در هر دو حالت میدان مغناطیسی عمود و موازی با سطح نمونه مورد ارزیابی مغناطیسی قرار گرفت. حلقه‌های پسماند اندازه‌گیری شده برای هر دو حالت میدان موازی و عمود بر سطح نمونه در شکل (۴-۴) الف آورده شده‌است. به منظور مشاهده بهتر حلقه‌های پسماند، منحنی پسماند در محدوده میدان مغناطیسی ۲۵۰- تا ۲۵۰ اورستد نیز در شکل (۴-۴) ب نشان داده شده است. بیشینه میدان مغناطیسی اعمالی در این اندازه‌گیری‌ها ۱۰۰۰ اورستد بوده‌است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مغناطش نمونه مورد بررسی در حالت میدان موازی با سطح نمونه در میدان‌های کمتری نسبت به حالت میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه، به اشباع می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت راستای موازی با سطح نمونه راستای آسان مغناطیسی آن است زیرا با میدان اعمالی کمتری به حالت اشباع می‌رسد. برای حالت میدان عمود بر سطح نمونه، مغناطش حتی تا میدان اعمالی حدود ۱۰۰۰ اورستد نیز به اشباع نمی‌رسد.



شکل ۴-۴: منحنی‌های پسماند نمونه $\text{Co}(45 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(45 \text{ nm})$ اندازه‌گیری شده در دو حالت میدان اعمالی موازی و عمود بر سطح نمونه الف) میدان مغناطیسی در بازه ۱۰۰۰- تا ۱۰۰۰+ اورستد، ب) میدان مغناطیسی در بازه ۲۵۰- تا ۲۵۰+ اورستد.

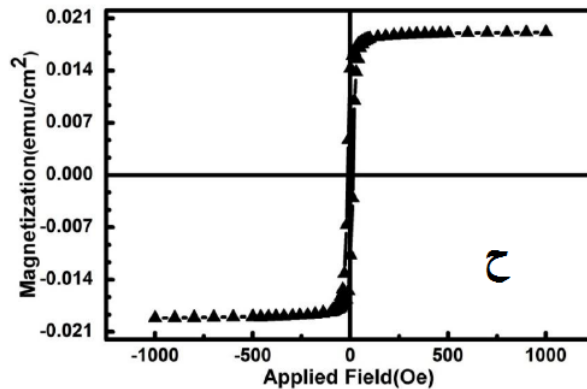
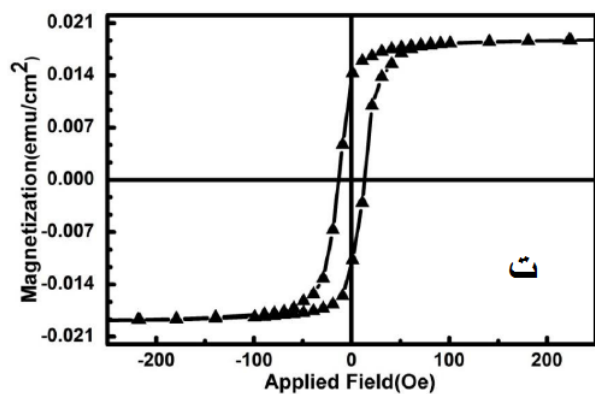
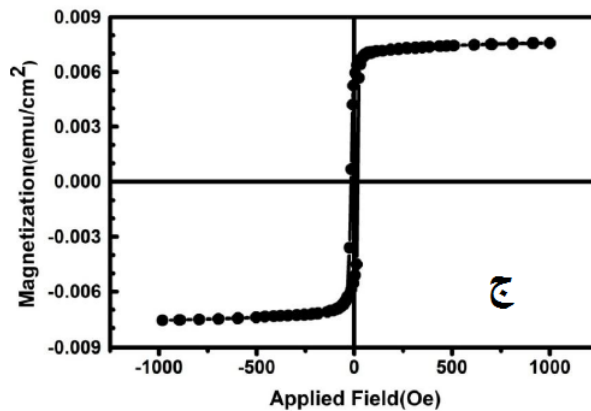
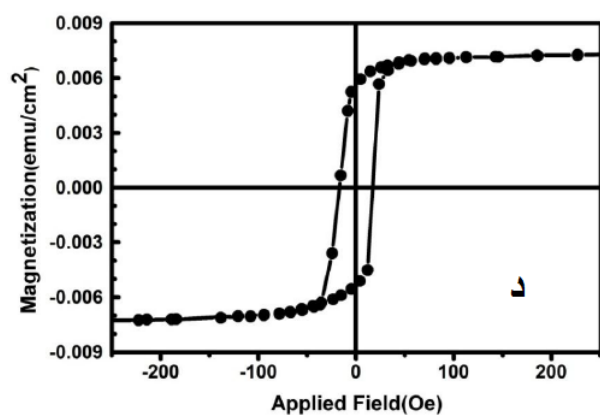
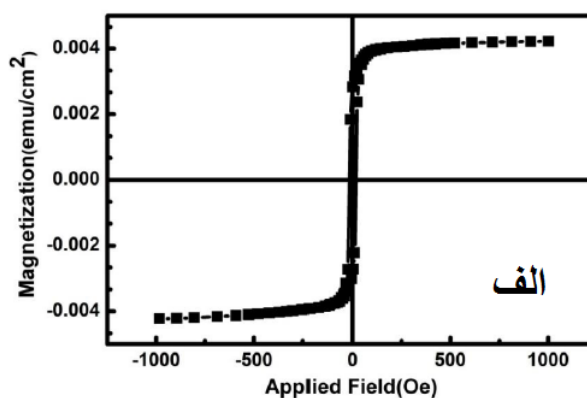
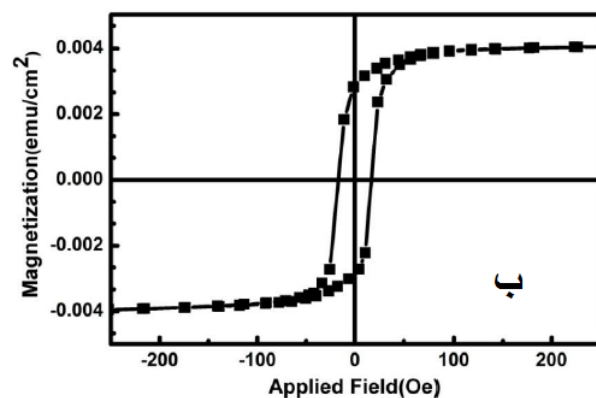
نتایج حاصل از تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول (۳-۴) گزارش شده‌اند.

جدول ۳-۴: نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های منحنی‌های پسماند نانو لایه $\text{Co}(45 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(45 \text{ nm})$.

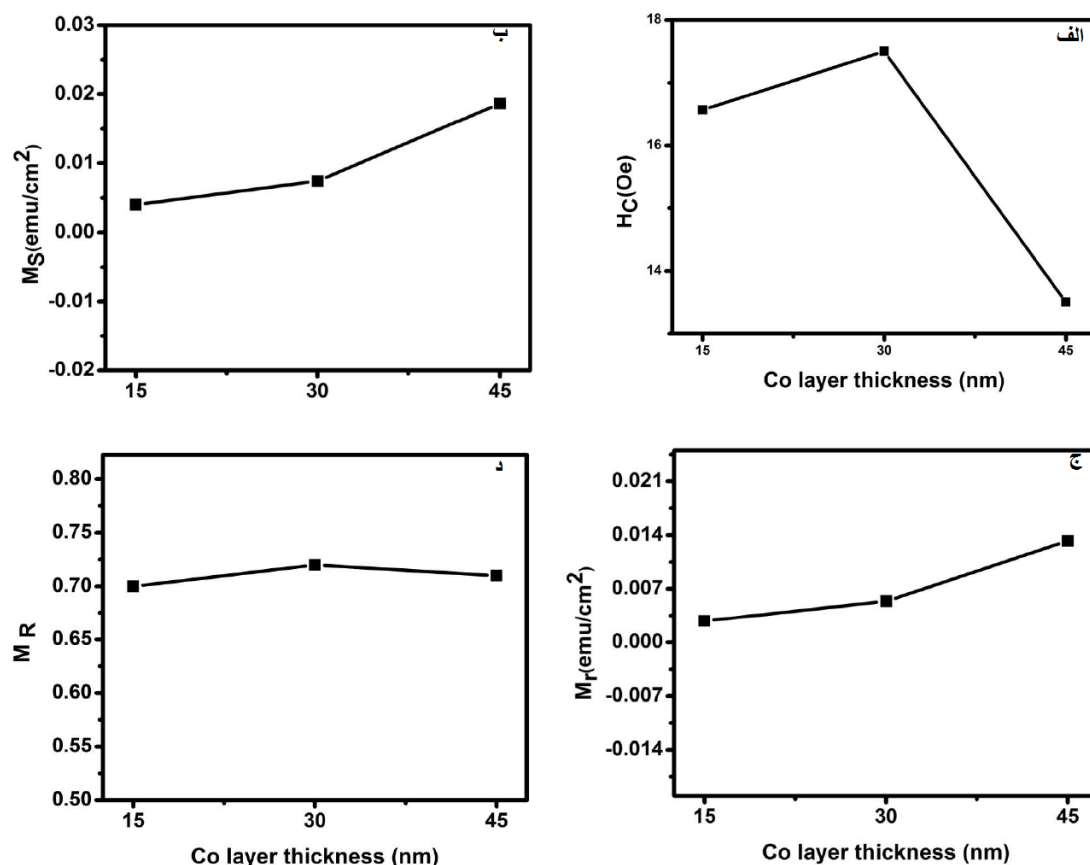
جهت میدان مغناطیسی اعمالی	مغناطش اشباع $M_s(\text{emu}/\text{cm}^2)$	مغناطش باقیمانده $M_r(\text{emu}/\text{cm}^2)$	میدان وادارندگی $H_C(\text{Oe})$	$M_R = \frac{M_r}{M_s}$	AF Coupling $1-M_R$
موازی بر سطح	۰/۰۱۸۶۵	۰/۰۱۳۲۵	۱۳/۵	۰/۷۱	۰/۲۹
عمود با سطح	$\approx 0/01865$	۰/۰۰۷۲	۱۵۲	$\approx 0/38$	$\approx 0/61$

بررسی مقادیر گزارش شده در جدول (۳-۴) نشان می‌دهد که مقدار میدان وادارندگی در حالتی که میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه است در مقایسه با حالتی که میدان مغناطیسی عمود بر سطح اعمال می‌شود، ۴۵٪ کمتر است، هر چه مقدار میدان وادارندگی کمتر باشد ماده از نظر مغناطیسی نرم‌تر است، زیرا با اعمال میدان وارون کوچک‌تری گشتاورهای مغناطیسی به صورت پادفرومغناطیس با یکدیگر جفت شده و گشتاور مغناطیسی کل صفر می‌شود. همچنین در حالت میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه در مقایسه با میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه، اعمال میدان کوچک‌تری نیاز است تا تمامی گشتاورهای مغناطیسی با میدان اعمالی هم‌جهت شده و به صورت فرومغناطیس با یکدیگر جفت شوند. مقادیر گزارش شده در جدول (۳-۴) مربوط به نسبت چهارگوشی در حالت عمود از حالت موازی کمتر است تفاوت این دو وابسته به وجود ناهمسانگردی در نمونه است. مقادیر جفت شدگی پادفرومغناطیس نشان می‌دهد جفت شدگی پادفرو در حالت میدان موازی با سطح نمونه به طور قابل توجهی کوچک‌تر از حالت عمود است. مقادیر مغناطش باقی مانده و شکل منحنی‌های پسماند نشان می‌دهد که راستای آسان مغناطش در صفحه نمونه‌ها واقع می‌باشند. به همین دلیل برای بقیه نمونه‌ها

اندازه‌گیری‌های مغناطیسی در حالت میدان موازی با سطح نمونه اندازه‌گیری شدند. به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه‌های کبالت بر خواص مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu/Co منحنی پسماند تمامی نمونه‌ها با ضخامت لایه مس ثابت و لایه‌های کبالت متغیر در دمای اتاق و در حالت میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. حلقه‌های پسماند مربوط به نمونه‌های نامگذاری شده در جدول (۴-۱) در شکل‌های (۴-۵) (الف، ج و ح) ترسیم شده‌اند. به منظور مشاهده بهتر حلقه‌های پسماند منحنی‌های پسماند در محدوده میدان ۲۵۰- تا ۲۵۰ اورستد نیز در شکل (۴-۵) (ب، د و ت) آورده شده‌اند. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول (۴-۴) گزارش شده‌است. به‌منظور سهولت در مقایسه، رفتار پارامترهای به دست آمده از منحنی پسماند شامل میدان وادارندگی، مغناطش اشباع، مغناطش باقیمانده و نسبت چهار گوشه برحسب ضخامت لایه کبالت در شکل‌های (۴-۶) (الف تا د) نشان داده شده‌است.



شکل ۴-۵: حلقه‌های پسماند نمونه‌های جدول (۴-۲، الف، ب) نمونه ۱ با ضخامت لایه کبالت ۱۵ نانومتر، ج، د) نمونه ۲ با ضخامت لایه کبالت ۳۰ نانومتر، ح و ت) نمونه ۳ ضخامت لایه کبالت ۴۵ نانومتر (در تمام نمونه‌ها ضخامت لایه مس ثابت و ۱۵ نانومتر).



شکل ۴-۶: تغییرات پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند بر حسب ضخامت لایه کبالت (الف) میدان وادارندگی، (ب) مغناطش اشباع، (ج) مغناطش باقیمانده، (د) نسبت چهار گوش.

در شکل (۴-۶) الف دیده می‌شود که ابتدا با افزایش ضخامت لایه کبالت از ۱۵ تا ۳۰ نانومتر میدان وادارندگی افزایش، سپس با افزایش ضخامت لایه کبالت از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر میدان وادارندگی کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش ضخامت لایه کبالت از ۱۵ تا ۳۰ نانومتر لایه‌ها از نظر مغناطیسی سخت‌تر و با افزایش بیشتر ضخامت کبالت از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر لایه‌ها از نظر مغناطیسی نرم‌تر می‌شوند. نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط گروه یامادا و همکاران برای ساختارهای چند لایه‌ای با ضخامت لایه کبالت متغیر (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ آنگستروم) در توافق می‌باشد [۱۵]. در شکل (۴-۶) (ب و ج) می‌بینیم که با افزایش ضخامت لایه‌های کبالت مغناطش اشباع و مغناطش باقیمانده افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش

ضخامت لایه مغناطیسی کبالت تعداد گشتاور مغناطیسی در واحد حجم افزایش می‌یابد، در نتیجه مغناطش اشباع و باقیمانده افزایش می‌یابد. این نیز با نتایج گزارش شده توسط گروه یامادا و همکاران در توافق می‌باشد. بررسی منحنی مربوط به نسبت چهار گوشه (د) نیز نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش ضخامت لایه‌های مغناطیسی کبالت از ۱۵ تا ۳۰ نانومتر نسبت چهار گوشه افزایش و سپس با افزایش ضخامت لایه‌های کبالت از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر این مقدار کاهش می‌یابد. میزان این تغییرات کم بوده و به مقدار ۱، که مشخصه حلقه مربعی است، نزدیک می‌باشد. مقادیر مربوط به جفت شدگی پادفرو نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی کبالت از ۱۵ تا ۳۰ نانومتر مقدار جفت شدگی پادفرو کاهش و سپس با افزایش ضخامت لایه مغناطیسی کبالت از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر افزایش می‌یابد.

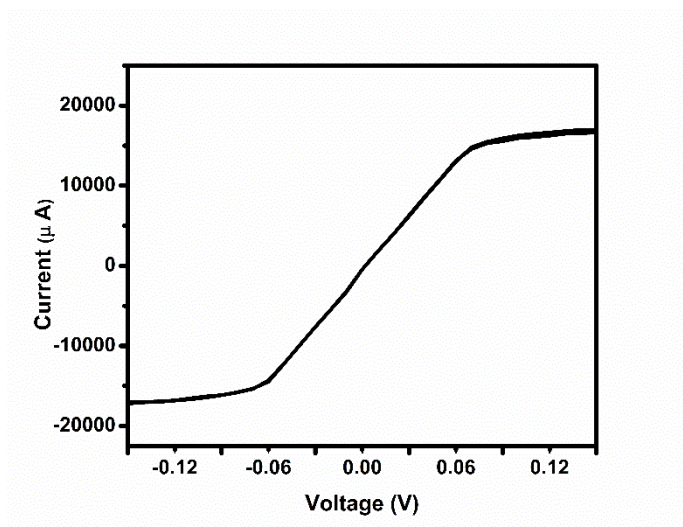
جدول ۴-۴: پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند شکل (۳-۴) (ضخامت لایه مس ثابت).

نمونه	ضخامت لایه کبالت (nm)	میدان وادارندگی $H_C(\text{Oe})$	مغناطش اشباع $M_S(\text{emu/cm}^2)$	مغناطش باقیمانده $M_R(\text{emu/cm}^2)$	$M_R = \frac{M_R}{M_S}$	AF Coupling 1- M_R
۱	۱۵	۱۶/۵۷	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۲۸	۰/۷۰	۰/۳۰
۲	۳۰	۱۷/۵۰	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۵۴	۰/۷۲	۰/۲۸
۳	۴۵	۱۳/۵۰	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۳۲	۰/۷۱	۰/۲۹

۴-۲-۴ اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی

از آنجایی که یکی از کاربردهای اصلی لایه‌های مغناطیسی بخصوص سیستم‌های چند لایه‌ای بحث مقاومت مغناطیسی آنها جهت کاربرد آنها در هدها می‌باشد لذا پس از رشد ساختارهای سه لایه‌ای،

Co/Cu/Co تغییرات مقاومت الکتریکی آن تحت حضور میدان‌های مختلف و بدون حضور میدان با استفاده از قاعده ون‌درپاو، که در بخش (۲-۱۰) مورد بحث قرار گرفت، و با استفاده از رابطه (۴-۱) بررسی شد. همانگونه که در بخش (۲-۱۰) اشاره شد اتصالات مورد نظر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی (شکل ۲-۷) برقرار گردید. به منظور بررسی اهمی بودن اتصالات سیم مسی به نمونه، نمودار جریان - ولتاژ آنها با استفاده از دستگاه الکتروانباشت اندازه‌گیری شدند. در شکل (۴-۷) نمودار جریان - ولتاژ مربوط به نمونه $\text{Co}(45 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(45 \text{ nm})$ نشان داده شده‌است. این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که این سه‌لایه‌ای در محدوده جریان ۱۵- تا ۱۵ میلی‌آمپر رفتار اهمی از خود نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که نمونه مورد نظر در بازه ۱۵- تا ۱۵ میلی‌آمپر اهمی است، این محدوده جریان را می‌توان در حین اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها به کار برد. همانطور که در شکل (۴-۷) می‌بینیم تغییرات ولتاژ برحسب جریان نیز حاکی از آن است که این سه‌لایه‌ای به صورت نسبتاً خوبی مطابق قانون اهم رفتار می‌کند.



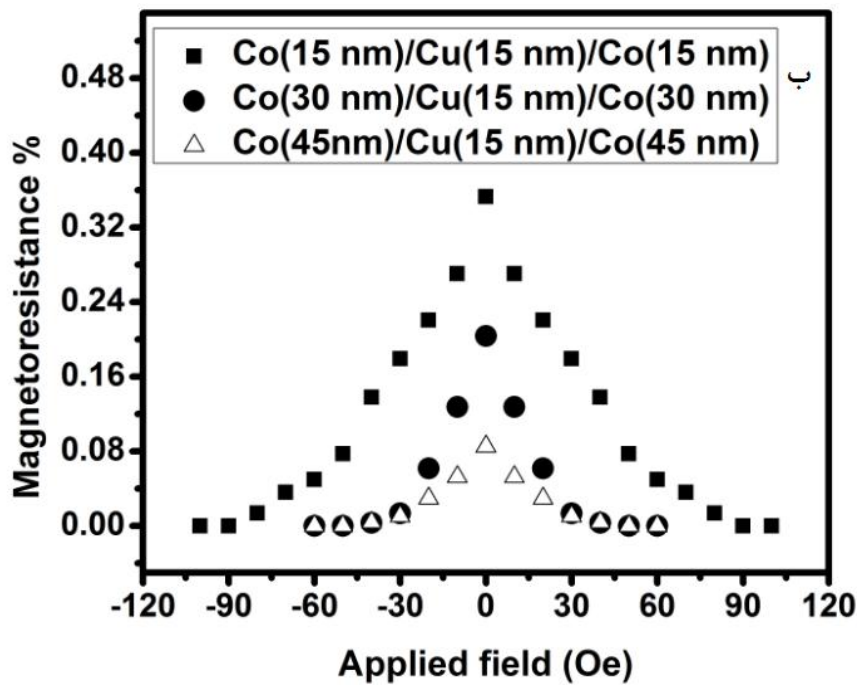
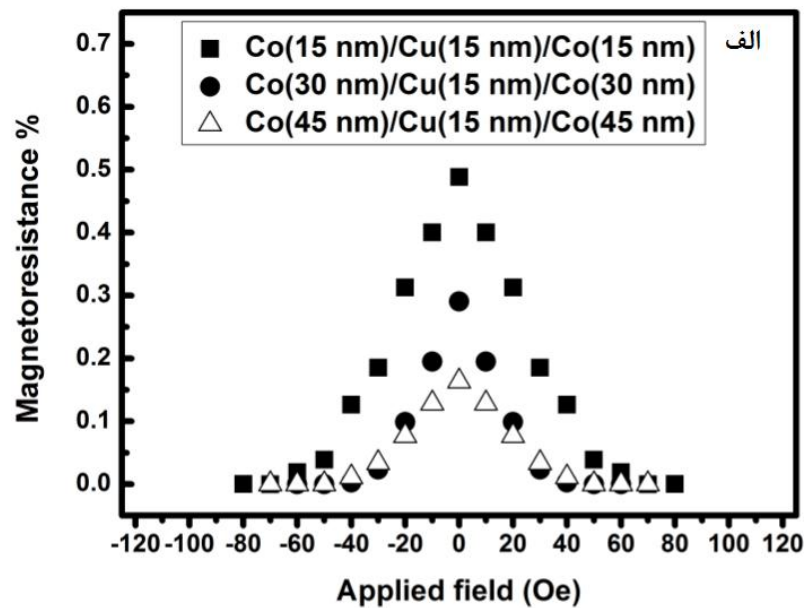
شکل ۴-۷: نمودار جریان بر حسب ولتاژ در ساختار سه‌لایه‌ای $\text{Co}(45 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(45 \text{ nm})$.

در اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها حالت میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه

انتخاب شد. برای این کار میدان مغناطیسی در دو حالت موازی با راستای جریان الکتریکی (مقاومت طولی) و عمود بر راستای جریان الکتریکی (مقاومت عرضی)، و در دمای اتاق اعمال گردید. شکل (۴-۸) الف و ب تغییرات مقاومت مغناطیسی نمونه‌های جدول (۴-۱) را برحسب میدان مغناطیسی اعمال شده نشان می‌دهد. سپس مقاومت نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۴-۱) زیر تعریف و محاسبه شدند [۵] که نتایج آن در جدول (۴-۵) گزارش شده است. که در رابطه فوق $R(H)$ و $R(H_S)$ به ترتیب مقاومت در حضور میدان و مقاومت اشباع می‌باشد.

$$GMR = \frac{R(H) - R(H_S)}{R(H_S)} \quad (۴-۱)$$

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌ها در میدان‌های مغناطیسی حدود ۸۰ Oe به اشباع می‌رسند. همانطور که در شکل‌های (۴-۸) الف و ب، نشان می‌دهد با افزایش میدان مغناطیسی از مقاومت نمونه‌ها کاسته شده و سپس به یک مقدار اشباع می‌رسد. پس از این افزایش میدان تأثیری در مقاومت نمونه‌ها ندارد. اندازه‌گیری‌های انجام شده به وضوح نشان می‌دهند که مقاومت چند لایه‌ای در میدان‌های کوچک در مقایسه با میدان‌های بزرگ، بسیار بزرگ‌تر است. این تغییرات و تفاوت‌ها را به تغییر در جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی نسبت می‌دهند از آنجا که با اعمال میدان‌های قوی مغناطیسی مغناطش لایه‌ها در جهت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، حدس می‌زنیم دلیل تغییر مقاومت آرایش پادموازی لایه‌ها، تغییر جهت‌گیری مغناطش لایه‌ها نسبت به یکدیگر است. همانطور که در بخش (۱-۹) عنوان شد بیشینه مقدار مقاومت مغناطیسی به ازای جفت شدگی پادفرومغناطیس و کمینه مقدار آن به ازای جفت شدگی فرومغناطیس لایه‌های مغناطیسی حاصل می‌گردد. بنابراین با دقت در رفتار نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در حالتی که میدان اعمال صفر است جفت شدگی گشتاورهای دو لایه فرومغناطیس به صورت پادفرومغناطیس می‌باشند، یعنی از همان ابتدا جفت شدگی گشتاورها اتفاق می‌افتد و در حالت اشباع، جفت شدگی گشتاورها به صورت فرومغناطیس می‌باشند.



شکل ۴-۸: تغییرات مقاومت مغناطیسی برحسب میدان اعمالی برای نمونه‌های با ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت متغیر ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نانومتر، در حالت الف) مقاومت مغناطیسی طولی، ب) مقاومت مغناطیسی عرضی.

جدول ۴-۵: مقادیر مقاومت مغناطیسی طولی و عرضی اندازه‌گیری شده نمونه‌های جدول (۴-۲).

نمونه	% مقاومت مغناطیسی طولی	% مقاومت مغناطیسی عرضی
Co(۱۵nm)/Cu(۱۵nm)/Co(۱۵nm)	۰/۴۹	۰/۳۵
Co(۳۰nm)/Cu(۱۵nm)/Co(۳۰nm)	۰/۲۹	۰/۲۰
Co(۴۵nm)/Cu(۱۵nm)/Co(۴۵nm)	۰/۱۶	۰/۰۹

نتایج ذکر شده در جدول (۴-۵) نشان می‌دهند که مقاومت مغناطیسی طولی تمام نمونه‌ها از مقاومت عرضی بیشتر بوده و مقدار مقاومت نمونه‌ها، با افزایش ضخامت لایه کبالت کاهش می‌یابد. آزمایشات نشان می‌دهند که وقتی ضخامت لایه جداساز ثابت نگه داشته شود، در صورتی که ضخامت لایه‌های مغناطیسی از حد معینی بزرگ‌تر باشد، مقاومت مغناطیسی برحسب ضخامت لایه‌های مغناطیسی نزولی است [۶]. همانطور که در بخش (۱-۹) گفت شده است، علت این تغییرات ممکن است ناشی از کاهش پراکندگی الکترون‌های رسانش باشد از آنجا که با کم شدن ضخامت لایه‌های مغناطیسی درصد نواحی مغناطیسی Bulk گونه کم می‌شود و درصد مرز لایه‌ها در واحد حجم زیاد می‌شود و این مسئله می‌تواند منجر به افزایش پراکندگی شود. بنابراین زیاد شدن مقاومت مغناطیسی را به طور کیفی به ازدیاد مرز لایه‌ها نسبت می‌دهیم [۶]. بیشترین تغییرات، مربوط به مقاومت طولی نمونه Co(۱۵ nm)/Co(۱۵ nm) است که برابر با ۰/۴۹ % می‌باشد. مقاومت عرضی نمونه‌ها نیز با افزایش ضخامت لایه کبالت کاهش می‌یابند. در این حالت نیز بیشترین مقدار تغییرات مقاومت مغناطیسی مربوط به نمونه Co(۱۵ nm)/Cu(۱۵ nm)/Co(۱۵ nm) می‌باشد که برابر با ۰/۳۵ % می‌باشد.

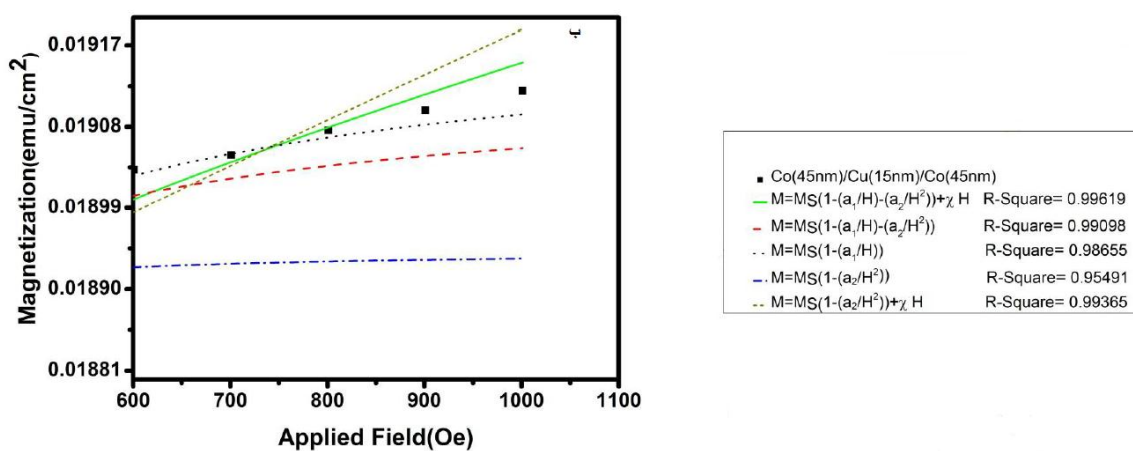
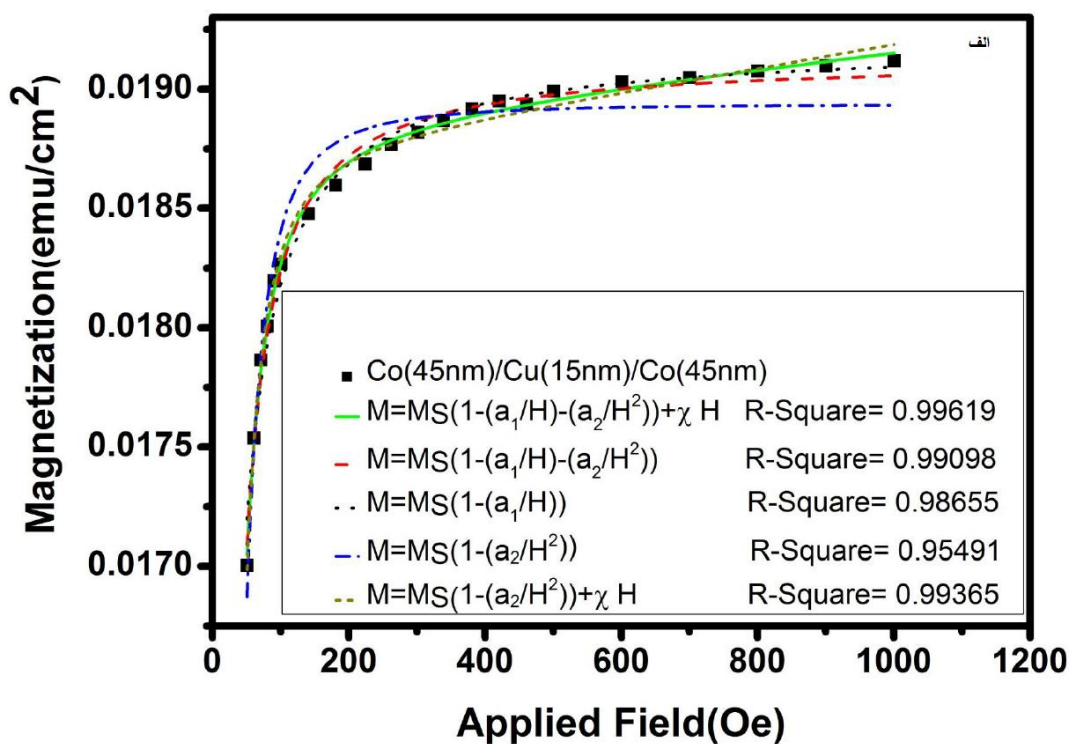
۵-۲-۴ بررسی قانون نزدیکی به اشباع

با استفاده از قانون نزدیکی به اشباع برای اندازه‌گیری ناهمسانگردی مغناطوبلوری مواد نانو ساختار که در بخش (۱-۹-۲) مورد بحث قرار گرفت، تغییرات مغناطش M برحسب تابعی از میدان مغناطیسی با یکی از روابط (۸-۲) و (۹-۲) زیر داده می‌شود [۱۳].

$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{H} - \frac{a_2}{H^2} - \frac{a_3}{H^3} \dots \right) + \chi H \quad (۸-۲)$$

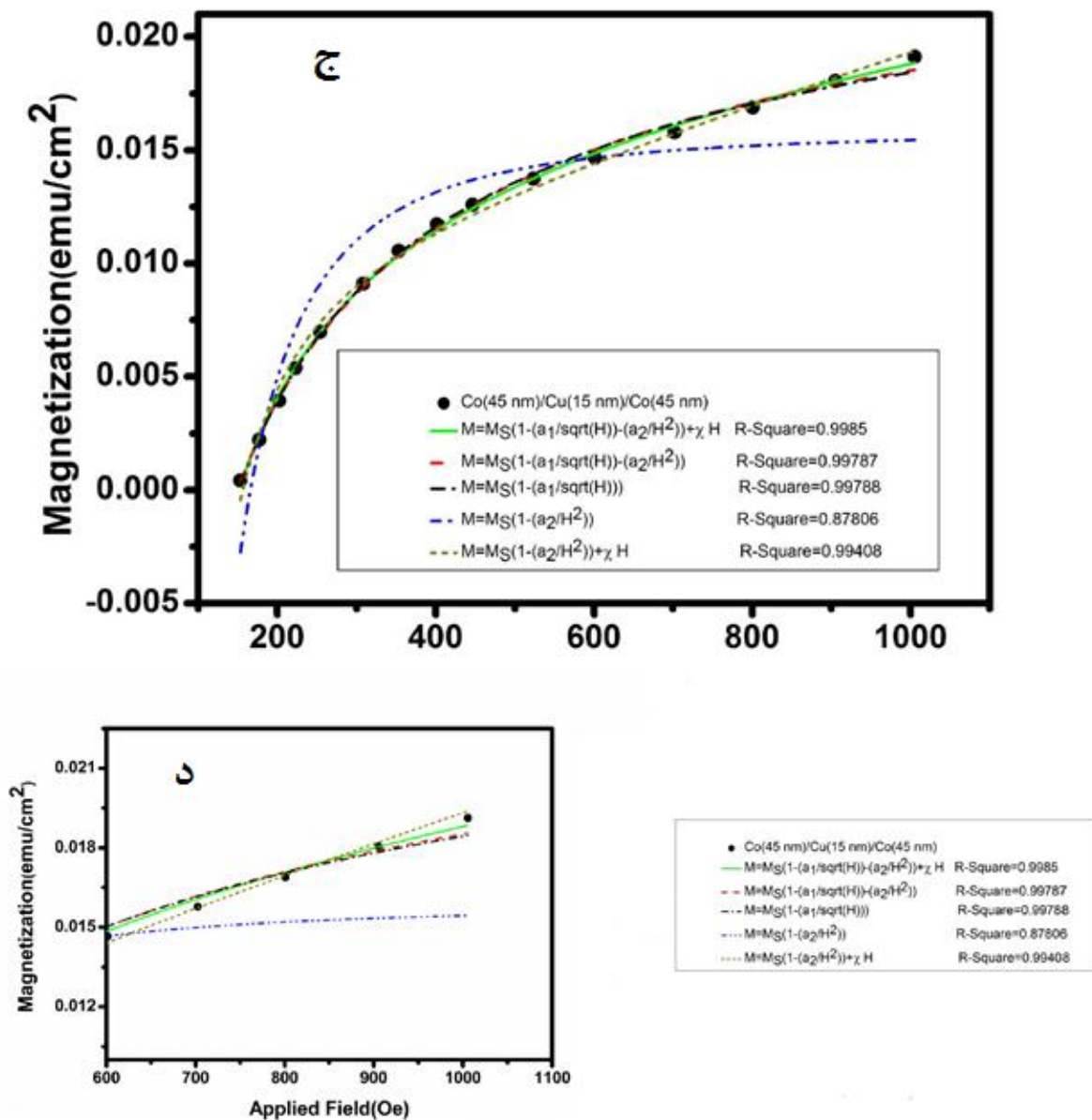
$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{\sqrt{H}} - \frac{a_2}{H^2} - \frac{a_3}{H^3} \dots \right) + \chi H \quad (۹-۲)$$

به منظور بررسی توافق داده‌های تجربی با روابط (۸-۲) و (۹-۲) ابتدا داده‌های تجربی حاصل از نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر) در هر دو راستای میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه به صورت عمود و موازی با هر یک از جملات روابط برازش شدند. نمودارهای مربوطه در شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) آمده است.



شکل ۴-۹: نمودارهای مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی و برازش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۲-۸)، الف میدان

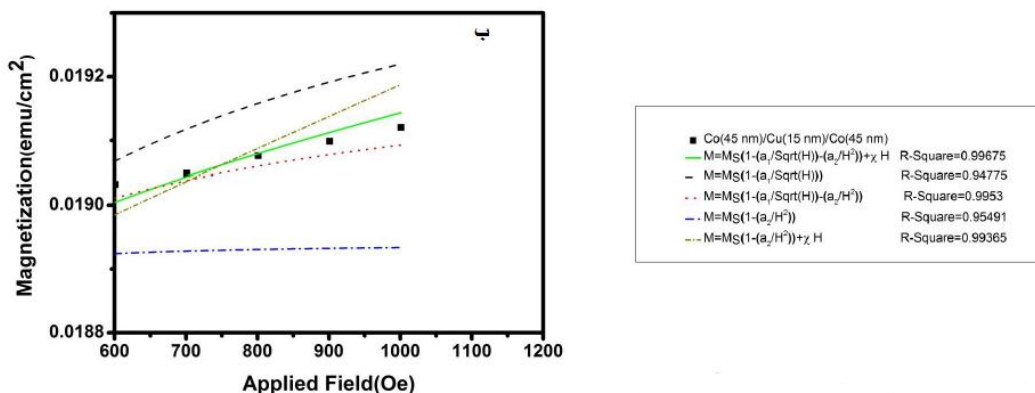
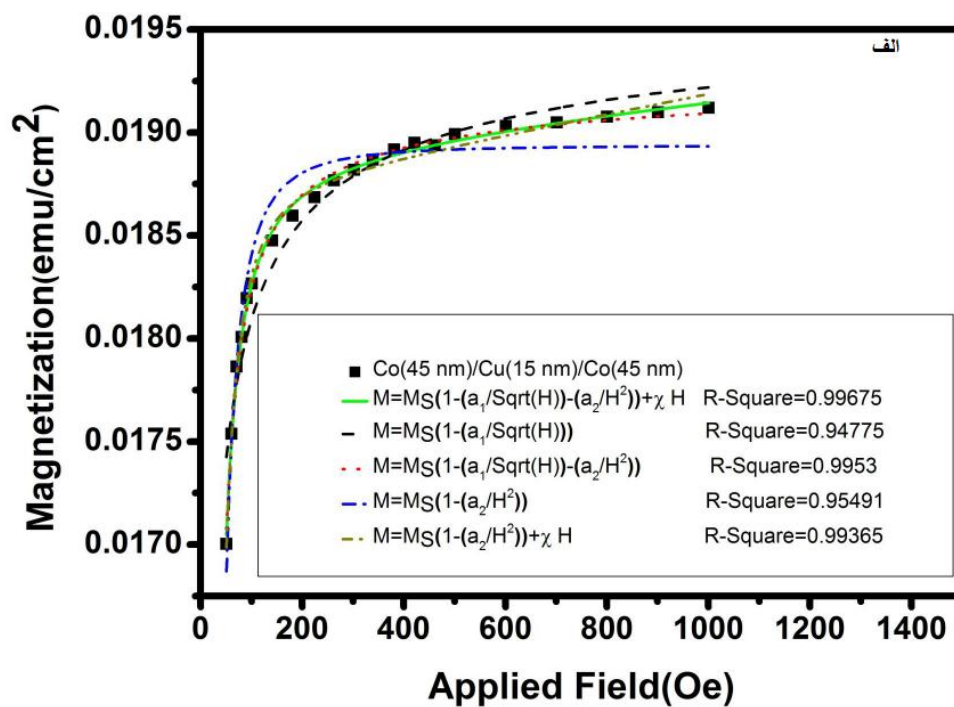
مغناطیسی موازی با سطح نمونه، و ب) همان نمونه الف در میدان بالا.



ادامه شکل ۴-۱۰: نمودارهای مغناطش برحسب میدان مغناطیسی و برازش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۲-۸)، ج

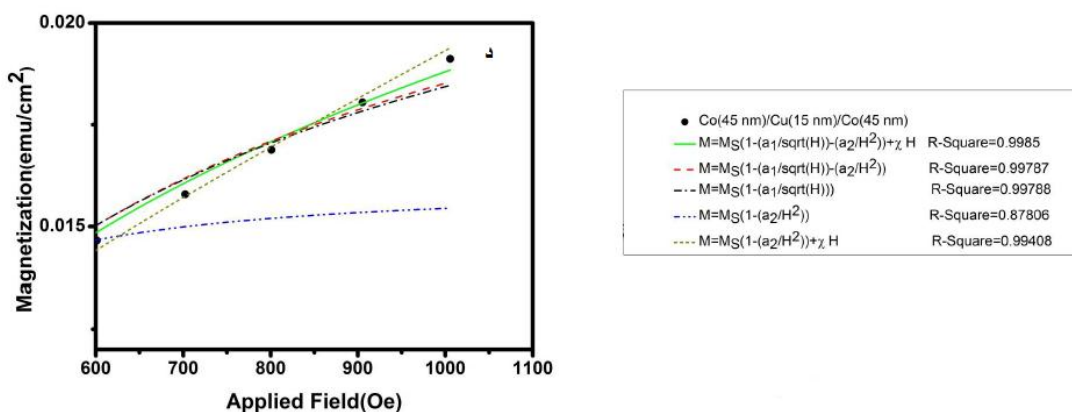
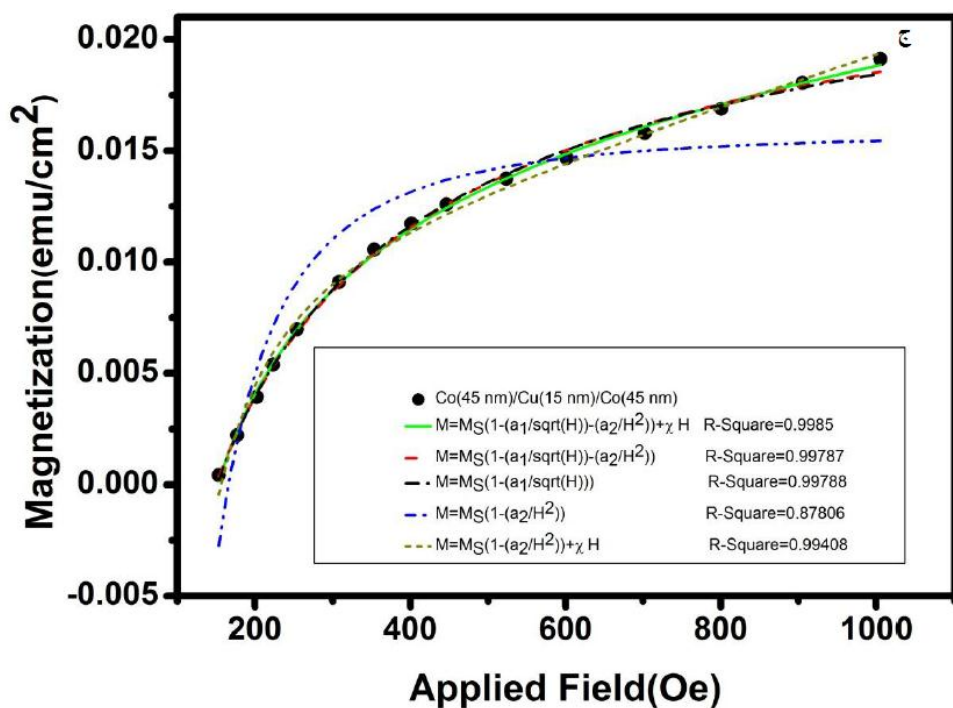
میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه، و د) همان نمونه ج در میدان بالا.

به منظور آشکار شدن اینکه کدام یک از جملات بسط رابطه (۲-۸) و (۲-۹) برازش بهتری با داده‌های تجربی از خود نشان می‌دهند قسمتی از حلقه پسماند که در آن نمونه‌ها به حالت اشباع رسیده‌اند (میدان‌های حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ اورستد) را در شکل‌های ب و د نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۱: نمودارهای مغناطش برحسب میدان مغناطیسی و برازش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۲-۹)، الف

میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه و ب) همان نمونه الف در میدان بالا.



ادامه شکل ۴-۱۲: نمودارهای مغناطش برحسب میدان مغناطیسی و برازش آن‌ها با جملات بسط رابطه (۲-۹)، ج

میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه و د) همان نمونه ج در میدان بالا.

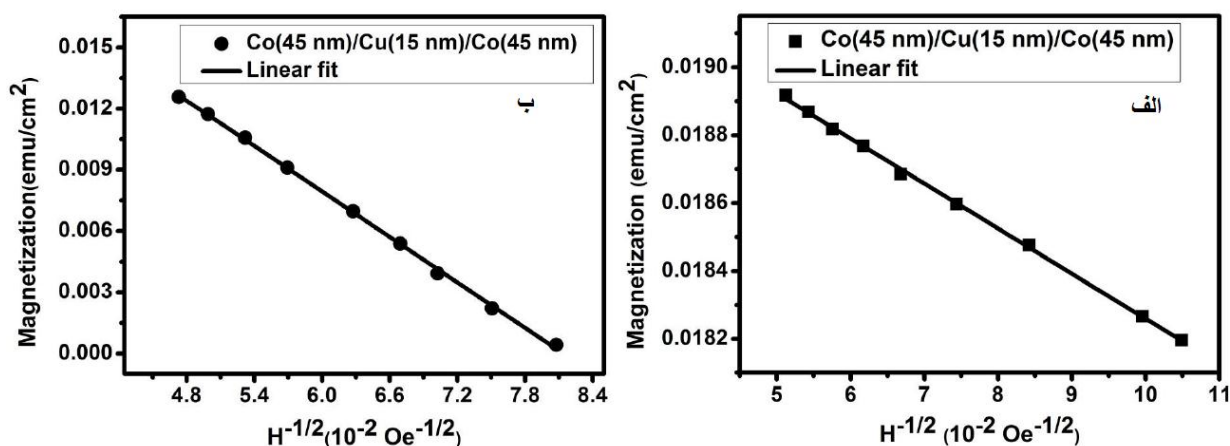
بررسی نتایج برازش نشان می‌دهد که رابطه (۴-۲) بهترین برازش ممکن با داده‌های تجربی را از

خود نشان می‌دهد.

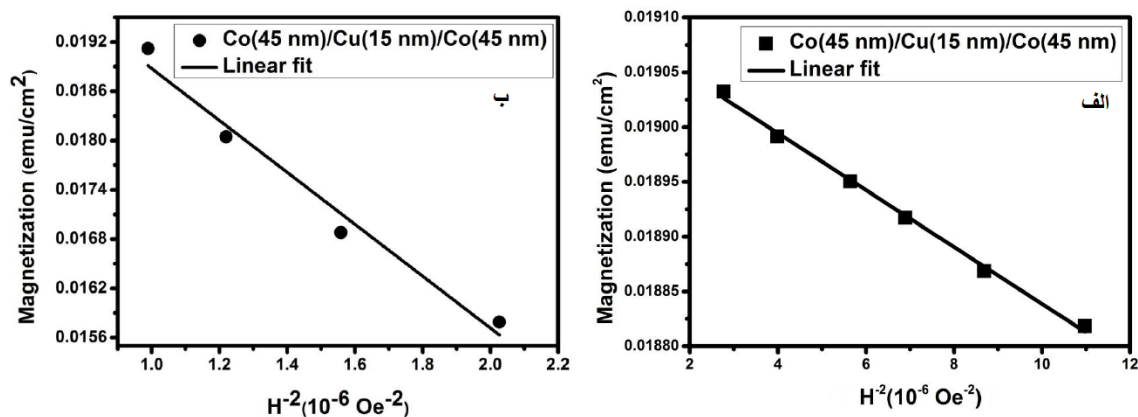
$$M = M_S \left(1 - \frac{a_1}{\sqrt{H}} - \frac{a_2}{H^2} \right) + \chi H \quad (4-2)$$

برای بررسی بیشتر این موضوع که در رابطه (۴-۲) اثر کدام جمله در چه بازه میدانی غالب است،

نمودارهای مغناطش M برحسب هر یک از جملات $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} برای هر دو حالت میدان مغناطیسی اعمالی عمود و موازی با سطح نمونه ترسیم شدند. نتایج این بررسی در شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) آمده‌است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که در حالت میدان مغناطیسی موازی با سطح نمونه، در بازه میدان مغناطیسی اعمالی بین ۹۰ تا ۴۰۰ اورستد وابستگی مغناطش به میدان به شکل $H^{-\frac{1}{2}}$ و در محدوده بین ۳۰۰ تا ۶۳۰ اورستد این وابستگی به صورت H^{-2} می‌باشد. در حالیکه برای حالت میدان عمود بر سطح نمونه، وابستگی $H^{-\frac{1}{2}}$ مغناطش به میدان اعمال شده، در بازه ۱۵۰ تا ۵۰۰ اورستد و وابستگی H^{-2} آن، در بازه ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ اورستد اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱۳: نمودارهای مغناطش برحسب $H^{-\frac{1}{2}}$ برای نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر)، الف) میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه (محدوده میدان ۱۰۰ تا ۴۰۰ اورستد)، ب) میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه (محدوده میدان ۱۵۰ تا ۵۰۰ اورستد).



شکل ۴-۱۴: نمودارهای مغناطش برحسب H^2 برای نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر)، الف) میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه (محدوده میدان ۳۰۰ تا ۶۰۰ اورستد)، ب) میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه (محدوده میدان از ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ اورستد).

ضرایب a_1 و a_2 و مغناطش اشباع بدست آمده از برازش با داده‌های تجربی محاسبه و در جدول (۴-۴)

(۶) گزارش شده است.

جدول ۴-۶: نتایج به دست آمده از برازش $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} با داده‌های تجربی مربوط به نمونه ۳ (ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر و ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر) شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲).

a_2 (Oe^{-2})	a_1 (Oe)	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H^2}$	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H^{\frac{1}{2}}}$	M_S تجربی	میدان مغناطیسی اعمالی
۱۳۵۹	۰/۶۷	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۵۹	۰/۰۱۸۶۵	موازی
۱۰۴۹۱	۱۲	۰/۰۱۳۴۴	۰/۰۳۰۲۱	$\approx ۰/۰۱۸۶۵$	عمود

بررسی جدول (۴-۶) نشان می‌دهد که مقادیر a_1 و a_2 بدست آمده در حالت میدان اعمالی موازی با سطح

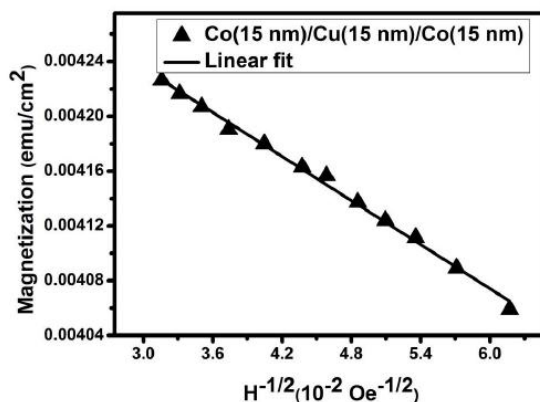
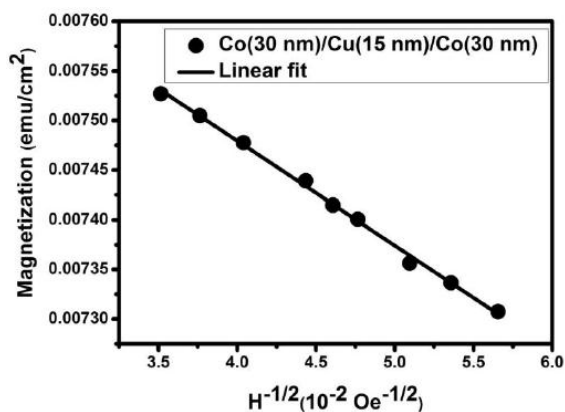
نمونه در مقایسه با حالتی که میدان مغناطیسی اعمال شده عمود بر سطح نمونه است، کوچک‌تر می‌باشد.

بنابراین محور آسان نمونه در صفحه لایه قرار دارد و ناهمسانگردی مغناطیسی در راستای موازی نسبت به راستای عمود بر نمونه کمتر است [۲].

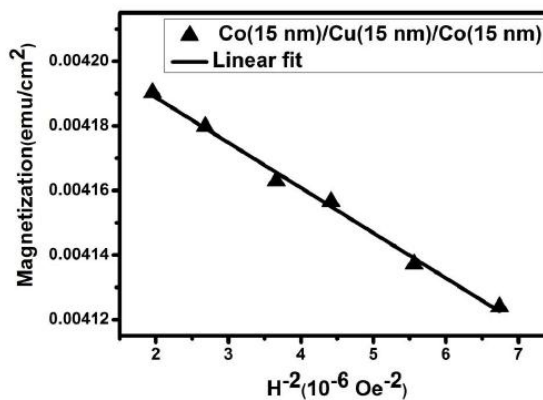
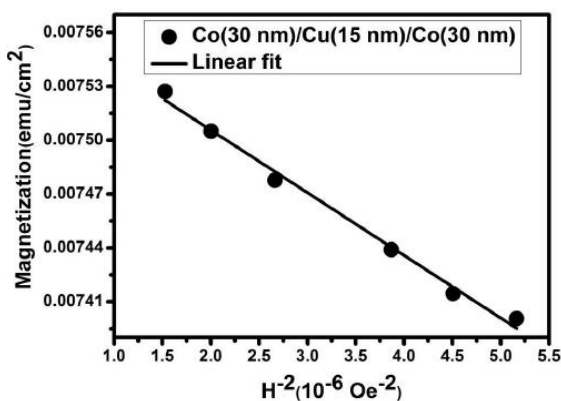
جدول ۴-۷: نتایج به دست آمده از برازش رابطه (۲-۹) با داده‌های تجربی نمونه ۳ (ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر).

جهت اندازه‌گیری	M_S تجربی (emu/cm ²)	M_S (emu/cm ²)	a_1 (Oe)	a_2 (Oe ²)
میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه	۰/۰۱۸۶۵	۰/۰۱۹۰۳	۰/۲۶	۱۸۲
میدان مغناطیسی اعمالی عمود بر سطح نمونه	$\approx 0/01865$	۰/۰۲۴۲۵	۱۱	۲۲۶۳

مقادیر بدست آمده از برازش رابطه (۲-۴) با داده‌های تجربی شکل (۴-۱۰) و جدول (۴-۷) مربوط به نمونه با ضخامت لایه مس ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۴۵ نانومتر نشان می‌دهند که مقادیر a_1 و a_2 در جهت موازی و عمود کاملاً متفاوت می‌باشند، در حالت میدان اعمالی موازی با سطح نمونه کوچک‌تر از مقادیر بدست آمده در حالت میدان عمود بر سطح نمونه می‌باشند. این می‌تواند ناشی از این حقیقت باشد که محور آسان نمونه در صفحه لایه قرار دارد و ناهمسانگردی نمونه در این راستا کمتر است. اما محور سخت آن در راستای عمود قرار داشته است. به منظور بررسی اینکه در رابطه (۲-۴) هر کدام از جملات بسط برای نمونه‌های ۱ و ۲ نیز در چه بازه میدانی غالب هستند، داده‌های تجربی مغناطش مربوط به این نمونه‌ها با هر یک از جملات H^{-2} و $H^{-\frac{1}{2}}$ برازش شدند. نتایج این بررسی در شکل (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ برحسب $H^{-\frac{1}{2}}$ (محدوده میدان ۹۰ تا ۱۰۰۰ اورستد).



شکل ۴-۱۶: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ برحسب H^{-2} (محدوده میدان ۳۰۰ تا ۸۰۰ اورستد).

نتایج این بررسی نشان داد که در بازه میدان مغناطیسی اعمالی در حدود ۹۰ - ۶۲۵ اورستد

وابستگی مغناطش به میدان به صورت $H^{-\frac{1}{2}}$ و در بازه ۳۰۰ تا ۸۰۰ اورستد این وابستگی به صورت H^{-2}

می‌باشد. ضرایب a_1 و a_2 و مغناطش اشباع بدست آمده از برازش با نتایج تجربی و همچنین ضریب K_{eff} .

محاسبه و در جدول (۴-۸) گزارش شده‌است. در ضمن ضریب K_{eff} با استفاده از رابطه (۲-۱۱) بدست

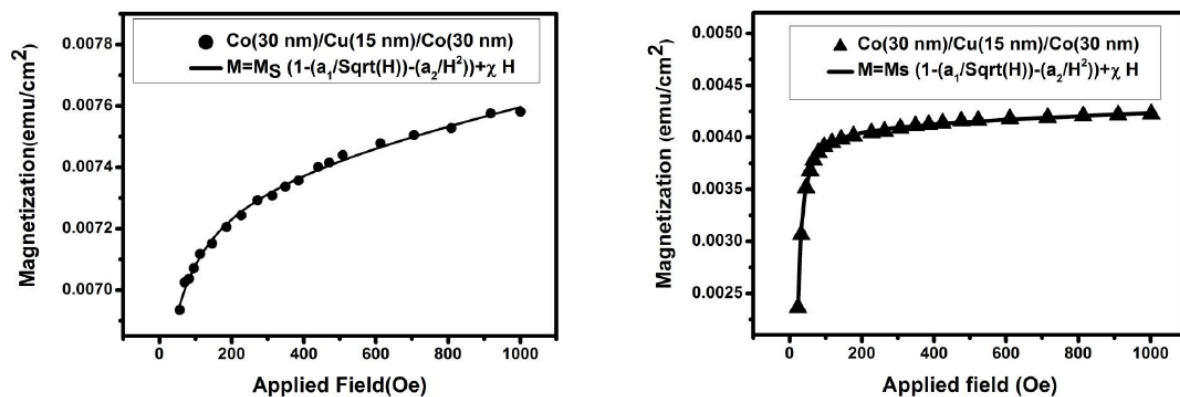
آمد.

جدول ۴-۸: نتایج به دست آمده از برازش $H^{-\frac{1}{2}}$ و H^{-2} با داده‌های تجربی جدول (۴-۲).

نمونه	ضخامت لایه کبالت (nm)	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H^2}$ (emu/cm ²)	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H}$ (emu/cm ²)	a_1 (Oe)	a_2 (Oe ²)	K_{eff} ($\frac{erg}{cm^2}$)
۱	۱۵	۰/۰۰۴۴۱	۰/۰۰۴۲۶	۱/۲۶	۸۶۲۷	۱/۴۳
۲	۳۰	۰/۰۰۷۷۴	۰/۰۰۷۵۷	۰/۹۵	۴۳۰۸	۱/۸۰
۳	۴۵	۰/۰۱۹۵۹	۰/۰۱۹۱	۰/۶۷	۱۳۵۹	۲/۵۵

برازش‌های رابطه (۴-۲) با داده‌های تجربی مربوط به نمونه‌های ۱ و ۲ در شکل (۴-۱۵) نشان داده

شده است.



شکل ۴-۱۷: برازش داده‌های تجربی با رابطه (۴-۲) مربوط به ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۱۵، ۳۰ نانومتر.

با استفاده از برازش‌های انجام شده مغناطش اشباع، ضرایب a_1 ، a_2 و همچنین K_{eff} بدست آمدند

که نتایج آن در جدول (۹-۴) گزارش شده‌اند.

جدول ۹-۴: نتایج حاصل از: برازش رابطه (۲-۴) با داده‌های تجربی مربوط به ضخامت لایه مس ثابت ۱۵ نانومتر و ضخامت لایه‌های کبالت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ نانومتر.

نمونه	M_S تجربی (emu/cm ²)	M_S بدست آمده (emu/cm ²)	a_1 (Oe)	a_2 (Oe ²)	K_{eff} ($\frac{erg}{cm^2}$)
۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴۳	۰/۷۴	۱۶۰	۰/۱۹
۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۷۶	۰/۵۸	۱۶۹	۰/۲۲
۳	۰/۰۱۸۶۵	۰/۰۱۹۴۳	۰/۴۷	۱۷۰	۰/۹۱

بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه کبالت، جمله $\frac{a_1}{H^2}$ کاهش می‌یابد. این جمله به نقص‌های ساختاری نمونه و همچنین وجود لایه غیر مغناطیسی مس وابسته است که باعث توزیع غیر یکنواخت جهت‌های مغناطش موضعی می‌شوند. بنابراین انتظار داریم با افزایش ضخامت لایه کبالت، جمله $\frac{a_1}{H^2}$ کاهش یابد [۲۰]. همچنین با افزایش ضخامت لایه کبالت مقادیر ثابت ناهمسانگردی مؤثر نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به پیوستگی لایه کبالت و ساختار بلوری ناشی از افزایش ضخامت لایه کبالت نسبت داد [۲۲].

۳-۴ بررسی تأثیر ضخامت لایه مس بر خواص فیزیکی نانو لایه‌های Co/Cu/Co

در این بخش به مطالعه اثر ضخامت لایه مس روی خواص ساختاری و مغناطیسی چندلایه‌ای

Co/Cu/Co می‌پردازیم. برای این مقصود لایه نشانی در سه ضخامت مختلف مس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نانومتر، درحالی که همراه با ثابت قرار دادن ضخامت لایه کبالت برابر ۳۰ نانومتر ثابت نگه داشته شده‌اند، بر روی زیر لایه شیشه انجام شد. مشخصات نمونه‌های رشد داده شده در جدول (۴-۱۰) آمده است.

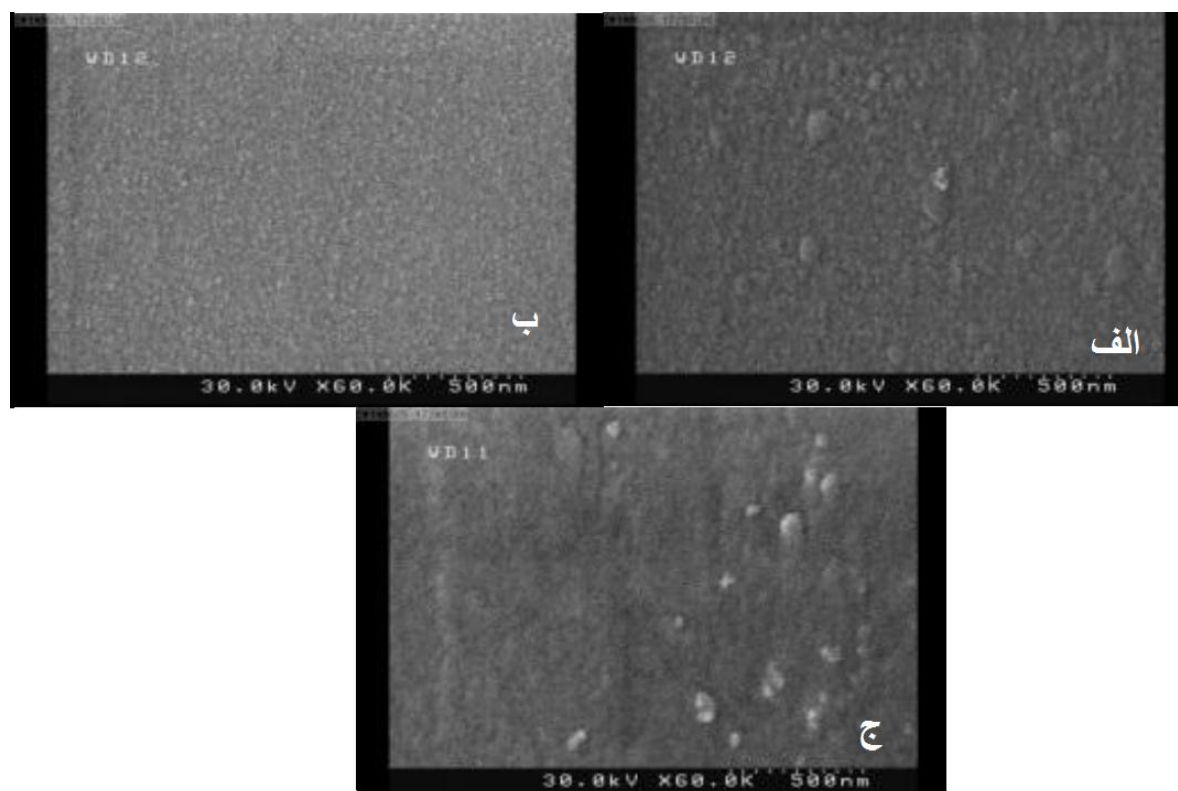
جدول ۴-۱۰: مشخصات نمونه‌های تهیه شده.

نمونه	ضخامت لایه کبالت (nm)	ضخامت لایه مس (nm)	ضخامت لایه کبالت (nm)
۱	۳۰	۳۰	۳۰
۲	۳۰	۴۵	۳۰
۳	۳۰	۶۰	۳۰

۴-۳-۱ خواص ساختاری

به منظور بررسی خواص ساختاری نمونه‌ها تصاویر FESEM از سطح آنها تهیه شد. نمونه‌ای از این تصاویر در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده‌است. تصاویر ثبت شده نشانگر انباشت نسبتاً یکنواخت سطح چندلایه‌ای‌ها بوده که ضمناً دارای ساختار دانه‌ای نیز هستند. مقایسه این تصاویر نشان می‌دهد که ساختار نمونه‌های ۱ و ۳ (ضخامت لایه مس ۳۰ و ۶۰ نانومتر) تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشند. در سطح این دو نمونه در مقایسه با نمونه ۲ (ضخامت لایه مس ۴۵ نانومتر) شاهد تشکیل دانه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تری هستیم. تصاویر ثبت شده از نمونه ۲ نشان می‌دهد که این نمونه سطح یکنواخت‌تر داشته و از دانه‌هایی با ابعاد ریزتری پوشیده شده است. نتیجه اینکه ابتدا با افزایش ضخامت لایه مس از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر اندازه دانه‌ها کوچک‌تر و ساختار یکنواخت‌تر گردیده است. سپس با افزایش بیشتر ضخامت مس از ۴۵ تا ۶۰ نانومتر شاهد حضور برجستگی‌ها و نایکنواختی بیشتری در ساختار این نمونه می‌باشیم. همچنین دانه‌های

سفید رنگ بزرگی با توزیع نایک‌نواخت در ساختار این نمونه دیده می‌شود. بنابراین افزایش ضخامت لایه مس در محدوده بررسی شده می‌تواند به‌طور عمومی باعث تغییر ساختار دانه‌ای و در نتیجه تغییر تراکم نانو لایه‌ها گردد.



شکل ۴-۱۸: تصاویر FESEM لایه‌های Co/Cu/Co با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس متغیر (الف) ۳۰، (ب) ۴۵ و (ج) ۶۰ نانومتر.

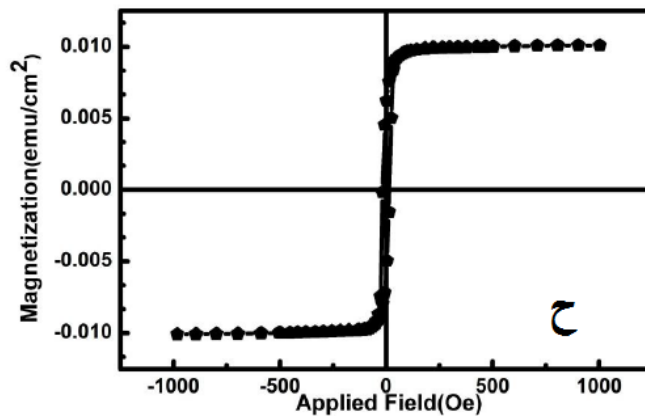
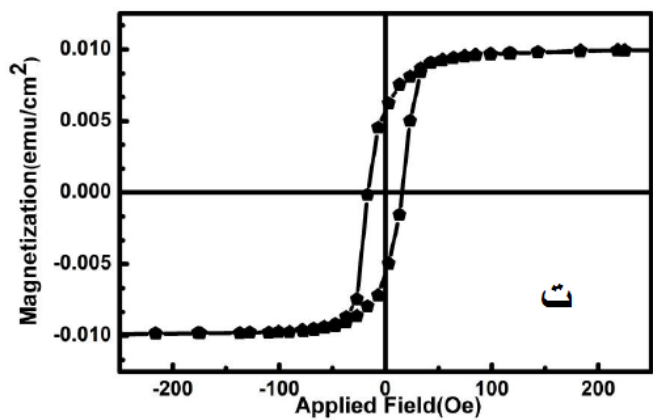
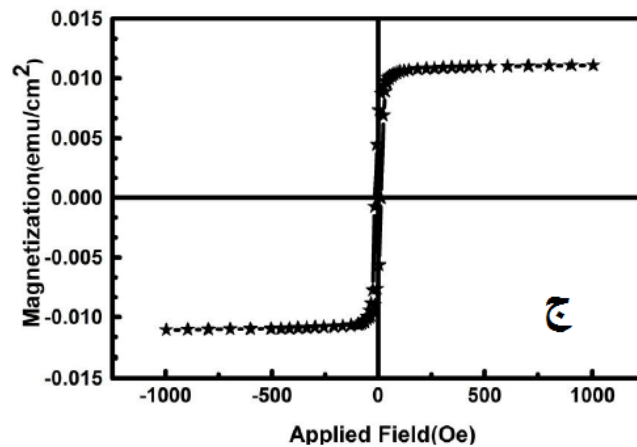
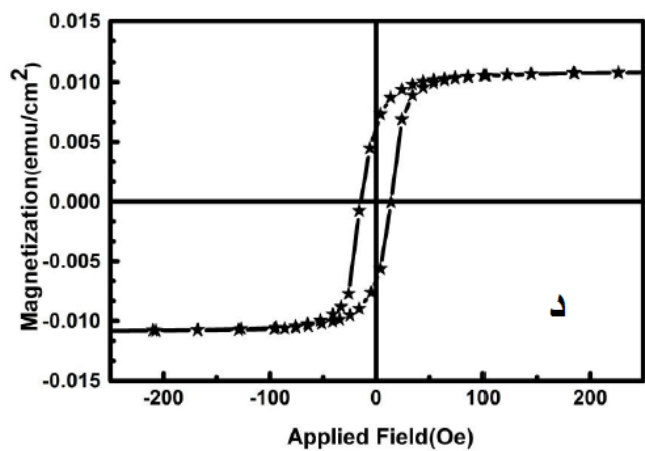
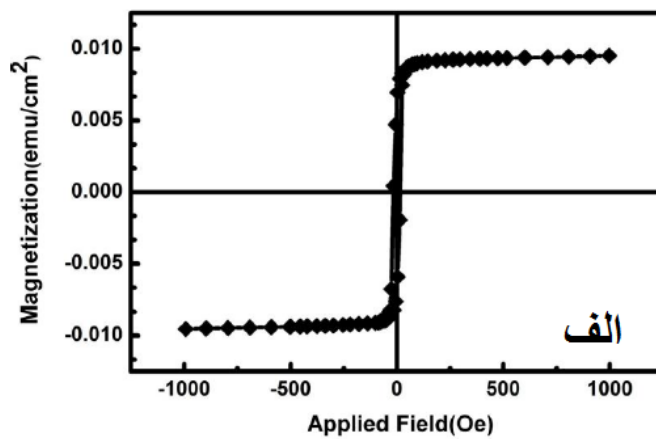
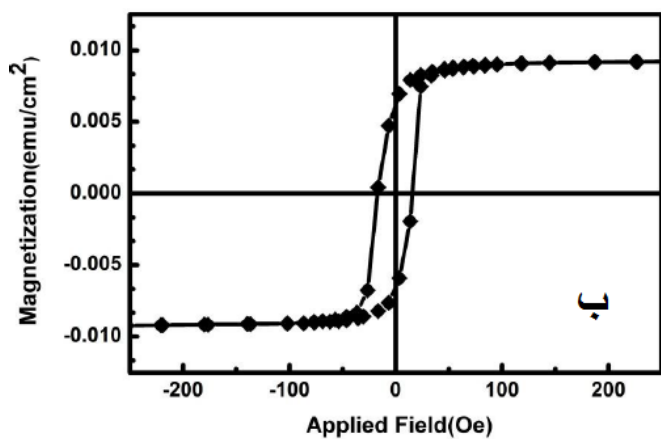
۴-۳-۲ خواص مغناطیسی

به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه غیر مغناطیسی مس بر خواص مغناطیسی نانو لایه‌های Co/Cu/Co، منحنی پسماند تمامی نمونه‌های با ضخامت لایه مس متغیر و لایه‌های کبالت ثابت در دمای اتاق و در حالت میدان مغناطیسی اعمالی موازی با سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. حلقه‌های پسماند اندازه‌گیری شده در شکل‌های (۴-۱۷) (الف، ج و ح) نشان داده شده‌است. به منظور مشاهده بهتر

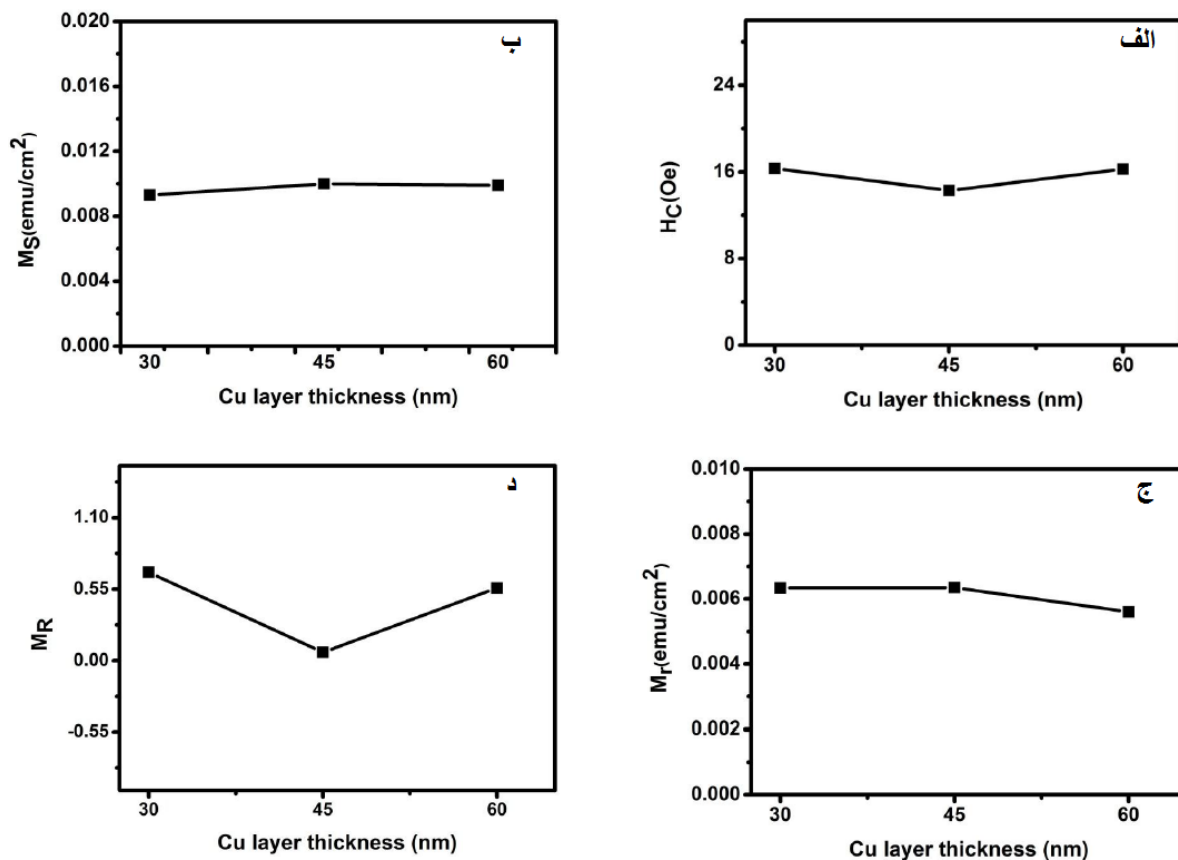
حلقه‌های پسماند منحنی‌های پسماند در محدوده میدان مغناطیسی ۲۵۰- تا ۲۵۰ اورستد نیز در شکل‌های (ب، د و ت) نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۴-۱۱) گزارش شده‌است.

جدول ۴-۱۱: پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های پسماند نمونه‌های Co/Cu/Co با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت و لایه مس متغیر.

نمونه	ضخامت لایه مس (nm)	میدان وادارندگی H_C (Oe)	مغناطش اشباع $M_S(\text{emu}/\text{cm}^2)$	مغناطش باقیمانده $M_R(\text{emu}/\text{cm}^2)$	$M_R = \frac{m_R}{m_S}$	AF Coupling $1-M_R$
۱	۳۰	۱۶/۳۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۶۳۴	۰/۶۸۰	۰/۳۲۰
۲	۴۵	۱۴/۲۸	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۶۳۵	۰/۶۳۵	۰/۳۶۵
۳	۶۰	۱۶/۲۶	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۵۶۰	۰/۵۶۰	۰/۴۴۰



شکل ۴-۱۹: حلقه‌های پسماند نمونه‌های Co/Cu/Co با ضخامت لایه‌های کبات ثابت و لایه مس متغیر الف (۳۰، ب) ۴۵ و ج) ۶۰ نانومتر.



شکل ۴-۲: تغییرات پارامترهای بدست آمده از منحنی های پسماند بر حسب ضخامت لایه مس (الف) میدان وادارندگی،

(ب) مغناطش اشباع، (ج) مغناطش باقیمانده، (د) نسبت چهار گوشه.

بررسی شکل (۴-۱۸) الف نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش ضخامت لایه مس از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر

میدان وادارندگی کاهش و سپس با افزایش ضخامت لایه مس از ۴۵ تا ۶۰ نانومتر افزایش می‌یابد، یعنی با

افزایش ضخامت لایه مس از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر نانو لایه‌ها از نظر مغناطیسی نرم‌تر و با افزایش بیشتر

ضخامت مس از ۴۵ تا ۶۰ نانومتر از نظر مغناطیسی سخت‌تر می‌شوند. نتایج به دست آمده با نتایج گزارش

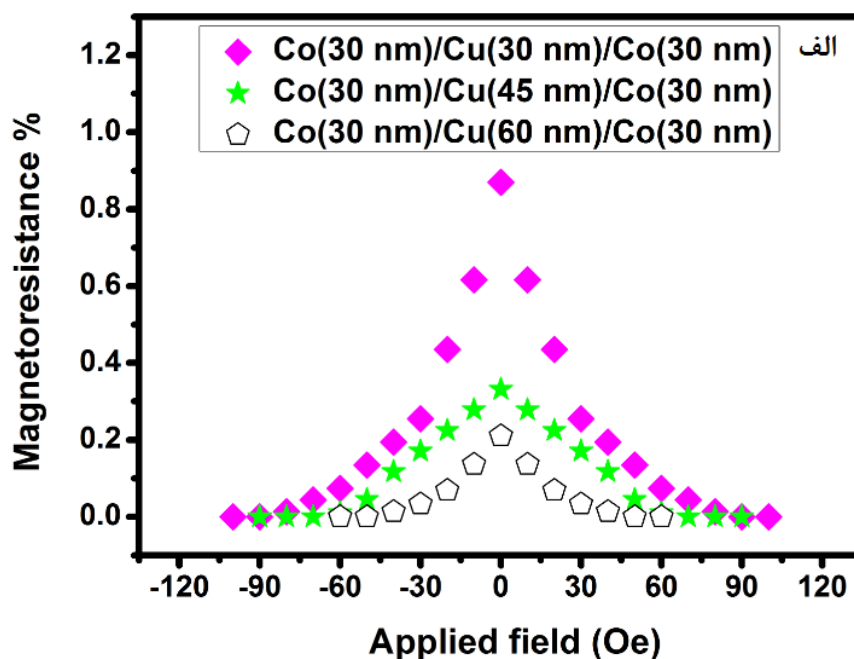
شده توسط گروه آدیه و همکاران برای ساختارهای چند لایه با ضخامت لایه مس متغیر، در توافق می‌باشد

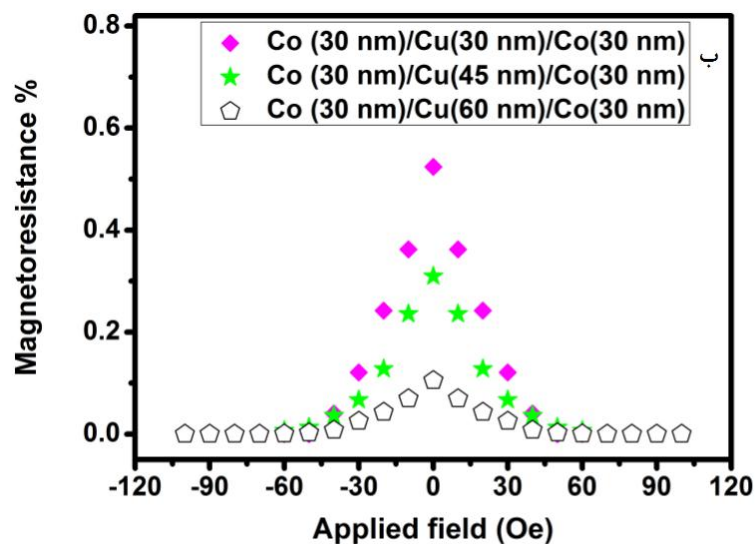
[۱۶]. همچنین بررسی شکل (۴-۱۸) ب و ج نشان می‌دهد که به دلیل ثابت بودن ضخامت لایه

فرومغناطیس کبالت و به دنبال آن تعداد گشتاور مغناطیسی در واحد حجم لایه، مغناطش اشباع و باقیمانده تقریباً ثابت است و تغییر چندانی نکرده است. مقایسه مقادیر نسبت‌های چهار گوشه بدست آمده (M_R) نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش ضخامت لایه غیر مغناطیسی مس از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر نسبت چهار گوشه کاهش و سپس با افزایش ضخامت مس از ۴۵ تا ۶۰ نانومتر افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر مربوط به جفت شدگی پادفرو نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه مس مقادیر جفت شدگی پادفرو افزایش می‌یابد.

۳-۳-۴ اندازه گیری‌های مقاومت مغناطیسی

تغییرات مقاومت مغناطیسی طولی و عرضی نمونه‌ها در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده‌است. در این حالت نمونه‌ها در میدان حدود ۷۰ Oe به اشباع می‌رسند. مقادیر مربوط به مقاومت مغناطیسی این نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۴-۱) محاسبه شده و در جدول (۴-۱۲) آورده شده‌اند.





شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات مقاومت مغناطیسی برحسب میدان مغناطیسی در نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس متغیر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نانومتر، الف) مقاومت مغناطیسی طولی، ب) مقاومت مغناطیسی عرضی.

جدول ۴-۱۲: مقادیر مقاومت مغناطیسی طولی و عرضی اندازه‌گیری شده نمونه‌های جدول (۴-۱۰).

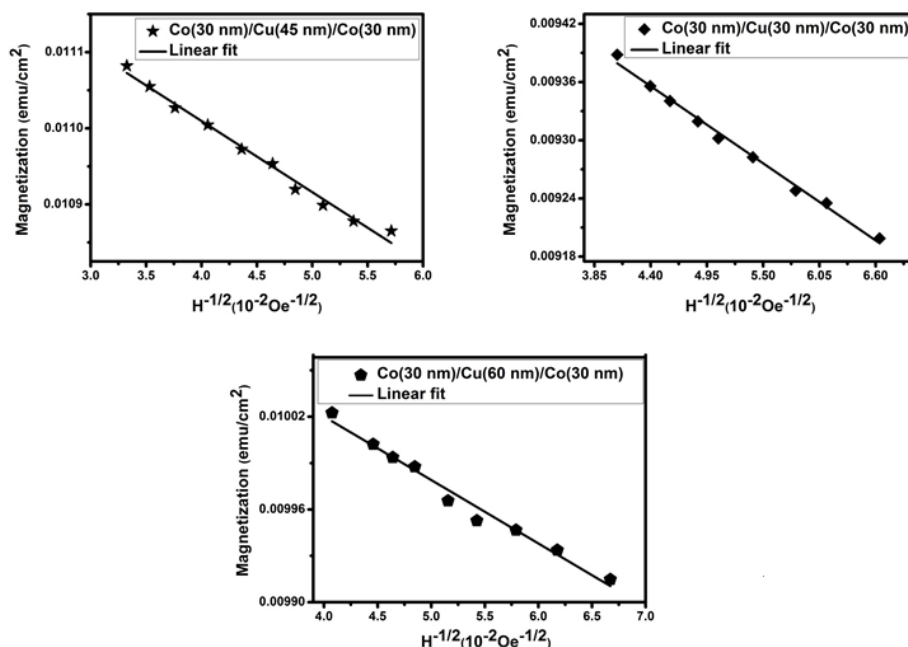
نمونه	٪ مقاومت مغناطیسی طولی	٪ مقاومت مغناطیسی عرضی
Co(۳۰nm)/Cu(۳۰nm)/Co(۳۰nm)	۰/۸	۰/۵۲
Co(۳۰nm)/Cu(۴۵nm)/Co(۳۰nm)	۰/۳۳	۰/۳۱
Co(۳۰nm)/Cu(۶۰nm)/Co(۳۰nm)	۰/۲۱	۰/۱۱

نتایج حاصل از جدول فوق نشان می‌دهد در این حالت نیز مقاومت طولی در تمام موارد از مقاومت عرضی بیشتر است. همینطور مقادیر مربوط به هر دو حالت مقاومت طولی و عرضی با افزایش ضخامت لایه میانی مس کاهش می‌یابند. دلیل این رفتار را می‌توان به شدت جفت شدگی بین لایه‌های مغناطیسی کبالت نسبت داد. از طرفی همانطور که در بخش (۱-۹) اشاره شد مقدار تغییرات مقاومت مغناطیسی به

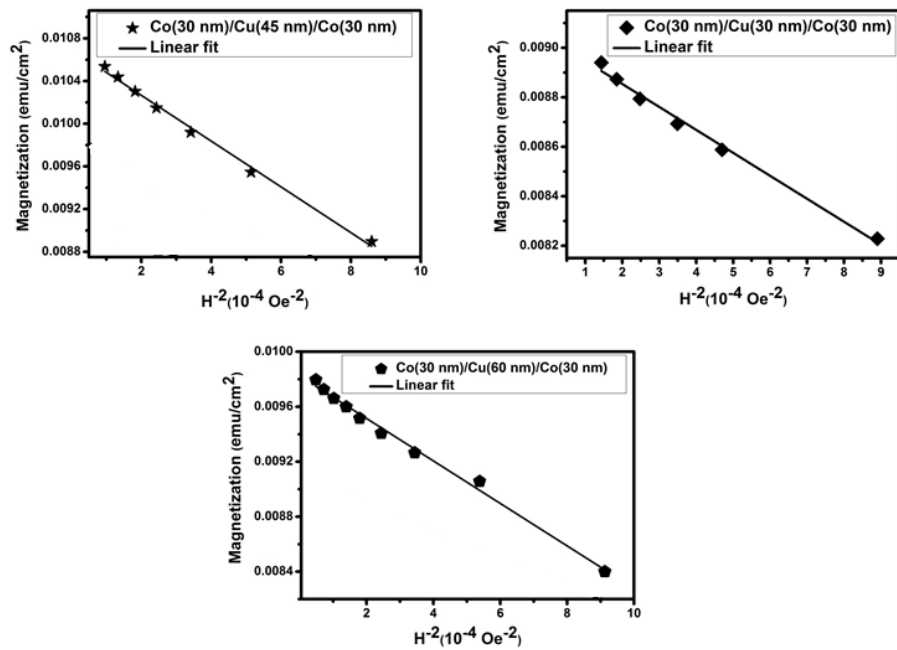
ضخامت لایه جداساز بستگی دارد، و از یک ضخامت آستانه به بعد، با افزایش ضخامت لایه میانی مس برهم کنش تبادلی بین لایه‌ای کاهش یافته و در نتیجه مقدار GMR کاهش می‌یابد. همچنین میتوان گفت با افزایش ضخامت لایه غیر مغناطیسی مس نواحی مغناطیسی درصد کمتری از کل نانولایه را تشکیل می‌دهند و در نتیجه تغییرات مقاومت با اعمال میدان کمتر خواهد بود [۶].

۴-۳-۴ بررسی قانون نزدیکی به اشباع

به منظور بررسی اینکه هر یک از جملات موجود در بسط رابطه (۴-۲) در چه بازه میدانی غالب هستند، داده‌های تجربی مغناطش مربوط به نمونه‌ها با جملات این بسط برازش شدند. نتایج حاصل از اینکار در شکل‌های (۴-۲) نشان داده شده است. ضرایب a_1 و a_2 و مغناطش اشباع بدست آمده از عمل برازش با داده‌های تجربی و همچنین ضریب K_{eff} محاسبه شده با استفاده از رابطه (۲-۱۱) در جدول (۴-۱۳) گزارش شده است.



شکل ۴-۲: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ برحسب $H^{-1/2}$ در محدوده میدان (۱۵۰ تا ۱۱۰۰ اورستد).



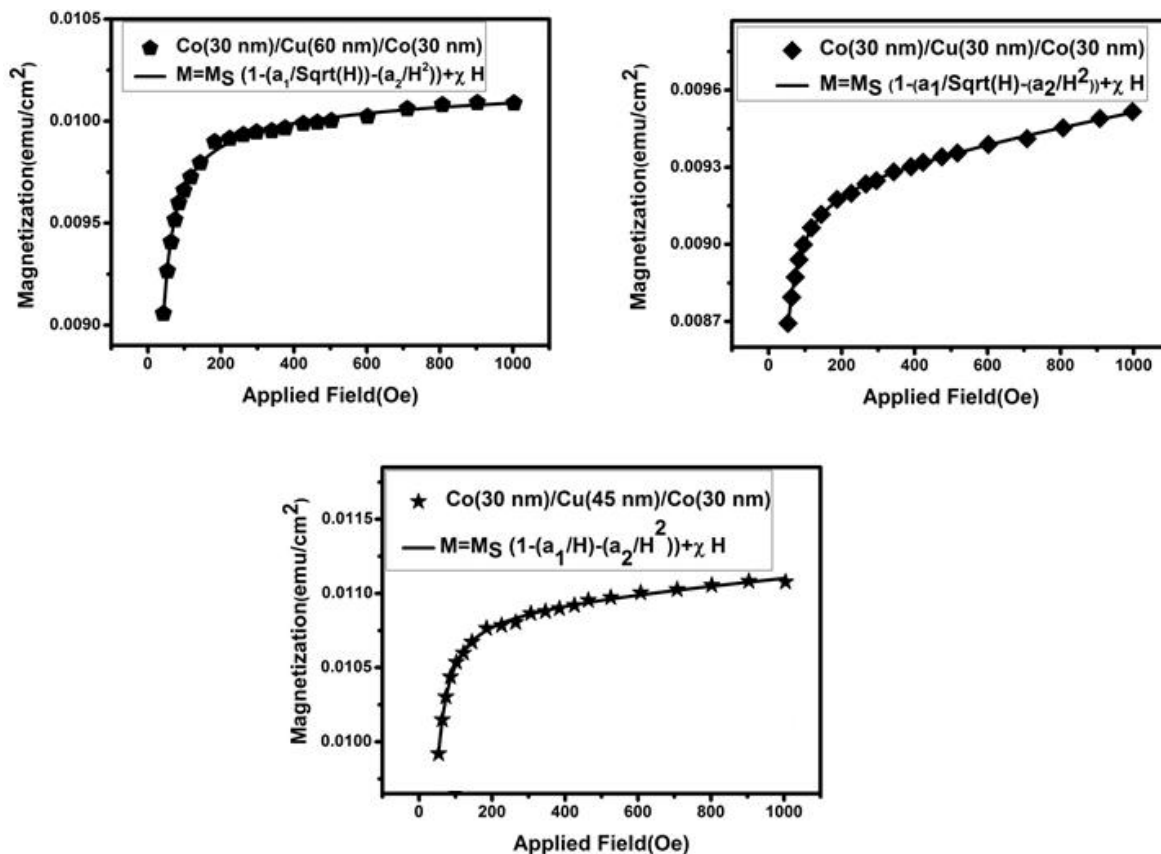
شکل ۴-۳: نمودارهای مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ برحسب H^{-2} (محدوده میدان از ۳۰ تا ۱۰۰ اوستد).

جدول ۴-۱: نتایج به دست آمده از برازش داده‌های تجربی مغناطش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ با جملات بسط رابطه (۴-۲)، برحسب H^{-2} و $H^{-\frac{1}{2}}$.

نمونه	ضخامت لایه مس (nm)	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H^2}$ (emu/cm ²)	M_S بدست آمده از $\frac{1}{H^2}$ (emu/cm ²)	a_1 (Oe)	a_2 (Oe ²)	K_{eff} ($\frac{erg}{cm^2}$)
۱	۳۰	۰/۰۰۹۶۷	۰/۰۰۹۰۴	۰/۰۰۷۴۷	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۳۳
۲	۴۵	۰/۰۱۱۳۸	۰/۰۱۰۶۹	۰/۰۰۸۲۱	۰/۰۲۰۰	۰/۰۰۵۴
۳	۶۰	۰/۰۱۰۱۸	۰/۰۰۹۸۲	۰/۰۰۴۰۳	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۴۳

پس از اینکه برازش داده‌های تجربی با جملات بسط رابطه (۴-۲) را بررسی کردیم، حال منحنی

مغناطش اندازه‌گیری شده را با استفاده از کل رابطه (۲-۴) برازش کرده که در شکل (۲۲-۴) آمده است. نتایج بدست آمده از برازش این منحنی‌ها برای ضرایب a_1 ، a_2 ، K_{eff} و همچنین مغناطش اشباع در جدول (۱۴-۴) گزارش شده است.



شکل ۲۴-۴: برازش داده‌های تجربی با رابطه (۲-۴) مربوط به نمونه‌هایی با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نانومتر.

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که در ۲۲۰ تا ۹۷۵ اورستد وابستگی مغناطش به میدان به صورت $H^{-\frac{1}{2}}$ و از در بازه ۳۰ تا ۱۰۰ اورستد این وابستگی به صورت H^{-2} است.

جدول ۴-۱۴: نتایج حاصل از برازش رابطه (۴-۲) با داده‌های تجربی مربوط به نمونه‌هایی با ضخامت لایه‌های کبالت ثابت ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه مس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ نانومتر.

نمونه	M_S تجربی (emu/cm ²)	M_S محاسبه شده (emu/cm ²)	a_1 (Oe)	a_2 (Oe ²)	K_{eff} ($\frac{erg}{cm^2}$)
۱	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۱	۰/۲۸	۱۴۸/۵۷	۰/۴۸
۲	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۱۰۲	۲/۷۱	۱۷۶	۰/۵۲
۳	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۹۳۶	۰/۳۰	۸۹	۰/۳۱

بررسی نتایج حاصل از برازش نشان می‌دهد که مقادیر a_1 و a_2 ابتدا با افزایش ضخامت لایه میانی مس از ۳۰ تا ۴۵ نانومتر افزایش و سپس با افزایش ضخامت لایه مس از ۴۵ تا ۶۰ نانومتر این مقدار کاهش می‌یابند. جمله $\frac{a_1}{H^2}$ با ناهمسانگردی ناشی از نقص ساختاری و حجم ماده غیر مغناطیسی مرتبط است. همچنین مقادیر K_{eff} نیز همراه با افزایش ضخامت لایه غیر مغناطیسی مس ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان به تغییرات ساختار بلوری ناشی از افزایش ضخامت لایه میانی مس نسبت داد [۲۲].

نتیجه گیری:

در این پایان نامه، ابتدا نانوساختارهای Co/Cu/Co با ضخامت‌های متغیر لایه مس و کبالت، به روش تبخیر حرارتی و بر روی زیرلایه شیشه تهیه شدند، سپس به بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی آنها پرداخته شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

الف) مطالعه پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه $\text{Co}(60 \text{ nm})/\text{Cu}(15 \text{ nm})/\text{Co}(60 \text{ nm})$ ، قله پراش (111) مربوط به ساختار مکعبی مرکز وجهی کبالت را نشان داد. لازم بذکر است که با توجه ضخامت کم سه لایه‌ای‌ها مطالعه ساختار چندلایه‌ای‌ها با دستگاه پراش اشعه x معمولی مشکل می‌باشد.

ب) تصاویر ثبت شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی سطح نمونه‌ها با ضخامت لایه مس ثابت نشان می‌دهد که ساختار سطح نمونه‌ها تقریباً یکسان می‌باشند. اگر چه با افزایش ضخامت لایه‌های کبالت حضور دانه‌هایی با ابعاد میانگین حدود 25 nm که تقریباً به طور یکنواخت در سراسر سطح لایه توزیع شده‌اند مشهودتر می‌باشد. نهایتاً اینکه تمام نمونه‌ها دارای ساختار دانه‌ای یکنواخت، متراکم و منسجم می‌باشند. برای نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت دیده شد که ابتدا با افزایش ضخامت لایه مس از 30 تا 45 نانومتر اندازه دانه‌ها کوچک‌تر و ساختار یکنواخت‌تر گردیده است، سپس با افزایش بیشتر ضخامت لایه مس از 45 تا 60 نانومتر شاهد حضور برجستگی‌ها و نایکنواختی بیشتری در سطح این نمونه می‌باشیم. بنابراین افزایش ضخامت لایه مس در محدوده بررسی شده می‌تواند به طور عمومی باعث تغییر ساختار دانه‌ای گردد.

ج) مطالعات خواص مغناطیسی نمونه‌ها که با دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی انجام گرفت نشان داد که مغناطش اشباع و باقیمانده زمانی که میدان مغناطیسی اعمالی عمود بر سطح نمونه می‌باشد، در مقایسه با حالت موازی با سطح نمونه بزرگ‌تر است. این بدان معنا است که محور آسان مغناطیسی

نمونه، در صفحه لایه قرار دارد. برای نمونه‌هایی با ضخامت لایه مس ثابت با افزایش ضخامت لایه کبالت مغناطش اشباع و باقیمانده افزایش می‌یابد، نمونه‌هایی با ضخامت لایه مس ثابت میدان وادارندگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و برای نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت، با افزایش ضخامت لایه مس مقادیر مغناطش اشباع و باقیمانده تغییر چندانی ندارند اما میدان وادارندگی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

(د) مطالعات مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها که به روش ون در پاو اندازه‌گیری شدند نشان داد که در تمام نمونه‌ها درصد مقاومت مغناطیسی طولی از درصد مقاومت مغناطیسی عرضی بیشتر است. برای نمونه‌های با ضخامت لایه مس ثابت همراه با افزایش ضخامت لایه کبالت مقادیر مقاومت کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت با افزایش ضخامت لایه مس مقادیر مقاومت کاهش می‌یابد. مقاومت مغناطیسی تمام نمونه‌ها در میدان کمتر از (Oe) ۱۰۰ به اشباع می‌رسند. بیشترین مقدار مقاومت مغناطیسی مشاهده شده ۰/۸ می‌باشد.

(ح) مطالعه ناهمسانگردی مغناطیسی نمونه‌ها، وابستگی مغناطش به میدان با استفاده از قانون نزدیکی به اشباع بررسی شد. در نمونه‌های با ضخامت لایه مس ثابت با افزایش ضخامت لایه کبالت مقدار $\frac{a_1}{H^2}$ که نشان دهنده سهم نقص‌های بلوری است کاهش یافت. ثابت ناهمسانگردی مؤثر نمونه‌ها، با افزایش ضخامت لایه کبالت افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های با ضخامت لایه کبالت ثابت، با افزایش ضخامت لایه مس مقادیر $\frac{a_1}{H^2}$ ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مقادیر ثابت ناهمسانگردی مؤثر نمونه‌ها نیز ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

پیشنهادهای جهت مطالعه و تحقیقات تکمیلی

با توجه به مطالعات و کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پایان نامه، جهت ادامه تحقیقات و مطالعات تکمیلی در این زمینه که در این پایان نامه میسر نشد در این بخش به عنوان پیشنهادات ارائه می‌شود.

۱- به جای لایه فرومغناطیس کبالت از ماده فرومغناطیس دیگری چون نیکل یا آهن استفاده شود.

۲- در این نانو لایه به جای لایه غیر مغناطیسی مس از سایر مواد غیر مغناطیسی از جمله Au, Ru استفاده و خواص مغناطیسی آن مورد بررسی قرار گیرد.

۳- از آنجا که مهمترین پارامتر در بررسی مقاومت مغناطیسی این ترکیبات ضخامت لایه جداساز و غیر مغناطیسی است سعی شود که لایه میانی دارای حداقل ضخامت باشد تا بتوانیم شاهد پدیده جفت شدگی تبدیلی بین لایه‌ای باشیم.

۴- از آنجا که ضخامت این چند لایه‌ای‌ها کم است زیر لایه نیز بر خواص آنها اثر می‌گذارد، پس به جای زیر لایه شیشه از سایر زیرلایه‌ها از جمله سیلیکون استفاده شود.

۵- عمل بازپخت هم بر خواص ساختاری و هم مقاومت مغناطیسی می‌تواند تأثیر آشکاری داشته باشد.

منابع:

- [۱] بی دی کالیتی، سی دی گراهام، (۱۳۹۳)، "مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی"، جلد اول، مترجمین محمد ابراهیم قاضی، محمد حسین عامریون، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شاهرود.
- [2] S. Arabi, (2011), Master of Science thesis, "Magnetic Characterization of Electrodeposited Nanocrystalline Ni and Ni-Fe alloys", Materials science and Engineering, McMaster University.
- [۳] چ. پول، ف. اونسز، (۱۳۸۷)، "مقدمه‌ای بر نانو فناوری"، جلد اول، مترجم نیما تقوی‌نیا، چاپ اول، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- [4] E. J. Lawson, Master of Sciencethesis, (2006), "INVESTIGATION OF THE STRUCTURE IN ELECTRODEPOSITED NANOSTRUCTURED Co/CuALLOYS, MULTILAYERS, AND CoFe/Cu MULTILAYERED NANOWIRES", in The Department of Chemistry, Louisiana State University.
- [5] C. W. Leung, (2002), PhD. Thesis, "Metallic Magnetic Heterostructures", University of Cambridge.
- [6] S. S. P. Parkin, (1990), "GIANT MAGNETORESISTANCE IN MAGNETIC NANOSTRUCTURES", Annu. Rev. Mater. Sci, 25, PP. 357-88.
- [7] A. FERT, P. BRUNO, (1994) "Ultrathin magnetic structur", vo 12, springer verlog, pp. 82-117.
- [۸] چ. کیتل، (۱۳۸۳)، "آشنایی با فیزیک حالت جامد"، جلد اول، ترجمه‌ی اعظم پورقاضی، مهدی صفا، جمشید عمیقیان، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- [۹] ل. اکراتوا، (۱۹۸۶)، "فیزیک لایه‌های نازک"، ویراست دوم، مترجم هادی سوالانی، مرکز نشر دانشگاهی.
- [۱۰] ع. بهاری، (۱۳۸۷)، "مقدمه‌ای بر نانو فیزیک"، ناشر دانشگاه مازندران.
- [11] B. fultz, J. Howe, (2007), "Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials", Springer.
- [12] W. Burgei, M.J. Pechan, H. Jaeger, (2003), "A simple vibrating sample magnetometer for use in a materials physics course", J. Of. Physics, 71. pp 825-828.
- [۱۳] م. افشاری، (۱۳۹۲) پایان نامه کارشناسی ارشد، "رشد و مطالعه نانو ساختارهای Fe/Cu/Fe"، دانشکده فیزیک، فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [14] S.B. Sakrani, Y.B. Wahab, Y.C. Laub, (2007), "Giant magnetoresistance effect in Co/Cu/Co nanostructures", Journal of Alloys and Compounds, 434-435, 598-600.
- [15] A. Yamada, T. Houga, Y. Ueda, (2002), "Magnetism and magnetoresistance of Co/Cu multilayer films produced by pulse control electrodeposition method", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 239, PP. 272-275.

- [16] A.O. Adeyeye, M.T. Win, T.A. Tan, G.S. Chong, V. Ng, T.S. Low, **(2004)**, “Planar Hall effect and magnetoresistance in Co/Cu multilayer films”, *Sensors and Actuators A*, 116, PP. 95–102.
- [17] D.K. Pandya, P. Gupta, S. C. Kashyap, S. Chaudhary, **(2009)**, “Electrodeposition and characterization of Cu/Co multilayers: Effect of individual Co and Cu layers on GMR magnitude and behavior”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321, PP. 974–978.
- [18] E. Go´mez, A. Labarta b, A. Llorente, E. Valle´s, **(2003)**, “Electrochemical behaviour and physical properties of Cu/Co multilayers”, *Electrochimica Acta*, 48, PP. 1005_ 1013.
- [19] J. Langer, J. Kraublich, R. Mattheis, St. Senz, D. Hesse, **(1999)**, “Characterisation of interfacial properties in sputtered Co/Cu multilayers: X-ray reflectometry compared with TEM and AFM”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 198-199, PP. 644-646.
- [20] S. V. Anderev, M. I. Bartashevich, V. I. Pushkarsky, V. N. Maltsev, L. A. Pamyatnykh, E. N. Tarasov, N. V. Kudrevatykh, T. Goto, **(1997)**, “Law of approach to saturation in highly anisotropic ferromagnets Application to Nd-Fe-B melt-spun ribbons”, *Journal of Alloys Compounds*, 260, PP. 196-200.
- [21] J. F. Bobo, **(1993)** “AF coupling of copper-cobalt multilayers with small grain size”, *Journal of magnetism and magnetic materials*, 121, PP. 291-295.
- [22] C. S. Rizal, Y. Ueda, **(2009)** “Magnetoresistance and Magnetic Anisotropy Properties of Strain-Induced Co/Ag Multilayer Films”, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 45, NO. 6.

Abstract

Purpose of this project is growth and magnetic characterization of the Co/Cu/Co nano structure. Among multi-layers growth methods, deposition by thermal evaporation method in vacuum is chosen. In order to investigate magnetic and structural properties of three layers, layers of cobalt and copper with different thicknesses were provided. To study the structure, X-ray diffraction patterns (XRD) was recorded, and morphology of the sample was investigated by field emission scanning electron microscopy (FESEM). Magnetic properties of the samples were measured by vibrating sample magnetometer device (VSM), and magnetoresistance of the samples were measured by van der pauw method. Finally, to evaluate the magnetic anisotropy, near to saturation law was used to fit the magnetic data. X-ray diffraction data showed (111) diffraction peak corresponding to cobalt's cubic structure (fcc). FESEM images of the samples showed that layers with constant, changing the cobalt layer thickness don't affect the morphology of the samples and all samples have uniform surfaces. When the cobalt layers thickness was constant, the grain size increases by increasing the copper layer thickness and then decreases for thicker samples. The magnetic measurements showed that the easy axis they in the layer plane. Also increasing the cobalt's magnetic layer thickness caused increase in saturation magnetization and residual magnetization. The magnetoresistance value reduced with increasing the layer thickness in both series of the samples. The magnetic anisotropy values obtained from fitting the magnetization data by near to saturation law revealed that the anisotropy increases by increase in cobalt layer thickness.

Key words: Tree layers cobalt-copper, Magnetic anisotropy, hysteresis loop, magnetoresistance.



Shahrood University

Faculty of physics

Master of Science Thesis

**Synthesize and study of physical propertis of FM/NFM/FM
multilayer**

By:

Soraya Afrooz

Supervisors:

Dr. Mohammad. E Ghazi

Dr. Morteza Izadifard

Feb 2014