

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

ساخت و اندازه گیری مقاومت مغناطیسی چند لایه های

glass/NiO/Co/Cu/Co/Ti و بررسی اثر بازپخت لیزری بر تغییرات مقاومت ac

سیم آمورف کبالت-پایه

دانشجو:

فاطمه مطرودی

استاد راهنما:

دکتر مجید قناعت شعار

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی طهرانچی

شهریور ۱۳۸۶

موسسه تخصصی زبان  
موسسه تخصصی زبان

۱۳۸۷ / ۱۱ / ۲۷

۱۰۲۴۲۳



دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ .....

شماره .....

پیوست .....

بسمه تعالی

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین

تلفن: ۲۹۹۰۱

« صور تجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۱۸۸۶ / ۲۰۰ / ت/د مورخ ۸۶/۶/۱۷ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه خانم فاطمه مطرودی به شماره شناسنامه ۱۸۲ صادره از هاشم شهر متولد ۱۳۶۰ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فوتونیک

با عنوان: ساخت و اندازه گیری مقاومت مغناطیسی چند لایه های glass/NiO/Co/Cu/Co/Ti و بررسی اثر بازپخت لیزری بر تغییرات مقاومت ac سیم آمورف کبالت- پایه

به راهنمایی: دکتر قناعت شعار

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۶/۶/۱۷ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۸۵ م ۱۸ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر قناعت شعار

۱۳۸۷ / ۱ / ۲۱

۲- استاد مشاور: دکتر طهرانچی

۳- استاد داور: دکتر فیروزنیا

۴- استاد داور: دکتر توسلی

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر نیکنام

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی :

الحمد لله الذي له ما في السماوات وما في الارض وله الحمد في الآخرة وهو الحكيم  
الخبير

از خانواده‌ی عزیزم به خاطر حمایت‌های بی‌دریغشان کمال سپاسگزاری را دارم و از استاد  
راهنمایم جناب آقای دکتر قناعت‌شعار بواسطه‌ی زحمات و راهنمایی‌هایشان قدردانی  
می‌نمایم. از آقای محسنی و آقای مرادی به خاطر ارائه‌ی راهکارهای مفید تشکر می‌کنم.  
از تمامی دوستانم در آزمایشگاه مگنتوآپتیک و پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما و تمام  
کسانی که به نحوی در انجام این پروژه با اینجانب همکاری داشته‌اند کمال تشکر و  
قدردانی را دارم. همچنین از دوستان بسیار عزیزم فاطمه صمادی، ایمان نجار، محبوبه  
آتشی، وحیده رضانی و زهرا منصوری که با بودن در کنار آنها توانستم سختی‌های این  
دوره را پشت سر بگذارم بسیار سپاسگزارم.

## چکیده

در این رساله به منظور ساخت دريچه اسپيني، چند لايه‌هاي مغناطيسي  $\text{glass/NiO/Co/Cu/Co/Ti}$  به روش تبخير باريکه الكتروني، لايه نشاني شدند. در اين ساختارها از اكسيد نيكل براي افزايش وادارندگي لايه كبات مجاور آن استفاده شد. در هنگام لايه‌نشاني تعدادي از اين ساختارهاي مغناطيسي، به منظور ثابت‌سازي ممان‌هاي مغناطيسي در لايه كبات مجاور با لايه اكسيد نيكل، ميدان مغناطيسي به‌وسيله دو عدد سيم‌پيچ اعمال شد. مقاومت مغناطيسي (MR) اين ساختارها به روش چهار-اتصال و با ميدان مغناطيسي درون صفحه فيلم و در راستاي جريان اندازه‌گيري شد. براي نمونه‌اي كه در حضور ميدان مغناطيسي لايه‌نشاني شد، حدود ۱۲٪ و براي نمونه‌اي كه در شرايط مشابه اما بدون اعمال ميدان مغناطيسي تهيه شد، حدود ۸٪ مقاومت مغناطيسي بسيار بزرگ (GMR) به دست آمد. در اين دو نمونه، ضخامت چهار لايه متوالي  $\text{Co/Cu/Co/Ti}$  حدود ۱۵nm بود.

در بخش ديگر از اين رساله، رفتار مقاومت ac سيم و نوار مغناطيسي آمورف كبات-پايه در ميدان مغناطيسي و نيز اثر بازپخت‌هاي ليزري بر آن بررسي شد. بازپختي كه در آن جريان ثابت ۹mA به مدت ۱۰ دقيقه همراه با تابش ليزر پالسي Nd:YAG از نمونه عبور داده شد، اندازه تغييرات مقاومت ac در اثر اعمال ميدان را افزايش داد. در حالي كه بازپخت‌هاي ليزري بدون اعمال اين جريان، اندازه MR متناوب را در نمونه اندكي کاهش داد.

كلمات كليدي: مقاومت مغناطيسي، GMR، دريچه اسپيني، اكسيدنيكل/كبات/مس/كبات، لايه‌نشاني تبخير باريکه الكتروني، سيم آمورف كبات-پايه.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه.....
۴	فصل دوم: خواص مغناطیسی و مواد مغناطیسی نرم.....
۵	۱-۲- فرومغناطیس و پادفرومغناطیس.....
۱۰	۲-۲- خواص مغناطیسی مواد.....
۱۱	۳-۲- مواد مغناطیسی نرم.....
۱۲	۱-۳-۲- خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم.....
۱۲	۱-۳-۲- تراوایی.....
۱۲	۲-۳-۲- وادارندگی.....
۱۲	۳-۳-۲- مغناطش اشباع.....
۱۳	۴-۳-۲- اتلاف پسماند.....
۱۳	۵-۳-۲- نشت انرژی و اتلاف توان.....
۱۳	۶-۳-۲- اثر بارکاسین.....
۱۴	۲-۳-۲- مواد مغناطیسی نرم جدید.....
۱۴	۱-۳-۲- مواد مغناطیسی نانو کریستالی.....
۱۴	۲-۳-۲- مواد مغناطیسی مصنوعی.....
۱۴	۳-۳-۲- نوارهای مغناطیسی آمورف.....
۱۵	۴-۳-۲- سیم‌های مغناطیسی آمورف.....
۱۹	۳-۳-۲- دیگر مواد مغناطیسی نرم نانو ساختاری.....
۲۲	فصل سوم: مقاومت مغناطیسی.....
۲۳	۱-۳- مقاومت مغناطیسی معمولی (OMR).....

- ۲۴-۲-۳- مقاومت مغناطیسی ناهمسانگرد (AMR) ..... ۲۴
- ۲۴-۳-۳- مقاومت مغناطیسی تونل زنی (TMR) ..... ۲۴
- ۲۴-۴-۳- مقاومت مغناطیسی فوق العاده بزرگ (CMR) ..... ۲۴
- ۲۵-۵-۳- مقاومت مغناطیسی بسیار بزرگ (GMR) ..... ۲۵
- ۳۰-۱-۵-۳- منشأ GMR ..... ۳۰
- ۳۲-۲-۵-۳- رسانش وابسته به اسپین ..... ۳۲
- ۳۴-۳-۵-۳- نقش ساختار نواری ..... ۳۴
- ۳۷-۴-۵-۳- مدل مقاومت ..... ۳۷
- ۴۱-۵-۵-۳- مروری بر کارهای انجام شده ..... ۴۱
- ۴۶-۶-۳- بایاس تبادل ..... ۴۶
- ۵۰-۷-۳- درجه اسپینی (SV) ..... ۵۰
- ۵۲-۱-۷-۳- آرایش ها و مواد مورد استفاده در ساختارهای درجه اسپینی ..... ۵۲
- ۵۲-۱-۱-۷-۳- لایه فرومغناطیسی ..... ۵۲
- ۵۴-۲-۱-۷-۳- لایه فاصل ..... ۵۴
- ۵۴-۳-۱-۷-۳- لایه پادفرومغناطیسی ..... ۵۴
- ۵۵-۲-۷-۳- شرایط رشد ..... ۵۵
- ۵۶-۳-۷-۳- جفت شدگی مگنتواستاتیک ..... ۵۶
- ۵۷-۴-۷-۳- همبستگی بین ساختار حوزه و مقاومت مغناطیسی ..... ۵۷
- ۵۷-۵-۷-۳- اثر چگالی جریان ..... ۵۷
- ۵۸-۸-۳- کاربردهای GMR ..... ۵۸
- ۵۸-۱-۸-۳- حافظه مغناطیسی با دسترسی تصادفی (MRAM) ..... ۵۸
- ۶۰-۲-۸-۳- حسگر میدان مغناطیسی ..... ۶۰
- ۶۳- فصل چهارم: امیدانس مغناطیسی و اندوکتانس مغناطیسی ..... ۶۳
- ۶۴-۱-۴- تعریف امیدانس مغناطیسی ..... ۶۴
- ۶۵-۲-۴- اثر پوسته ..... ۶۵
- ۶۵-۳-۴- اثر اندوکتانس مغناطیسی ..... ۶۵
- ۶۷-۴-۴- مروری بر کارهای انجام شده ..... ۶۷
- ۷۱- فصل پنجم: نتایج تجربی ..... ۷۱
- ۷۲-۱-۵- نتایج اندازه گیری روی نوار مغناطیسی  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  ..... ۷۲
- ۷۲-۲-۵- نتایج اندازه گیری روی سیم مغناطیسی آمورف  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  ..... ۷۲
- ۸۲-۳-۵- نتایج لایه نشانی فیلم های چندلایه و اندازه گیری مقاومت مغناطیسی ..... ۸۲



- ۱-۳-۵- فراهم کردن هدف برای لایه‌نشانی ..... ۸۲
- ۲-۳-۵- نحوه لایه‌نشانی ..... ۸۳
- ۳-۳-۵- روش اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی ..... ۸۷
- ۴-۳-۵- بررسی ساختار چندلایه‌ها ..... ۸۹
- ۵-۳-۵- نتایج اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی در چندلایه‌ها ..... ۹۱
- ۴-۵- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ..... ۹۴
- مراجع ..... ۹۶

## فهرست جدول‌ها

- ۴-۱. MR طولی و عرضی برای سیم آمورف Fe-Si-B در دمای اتاق [۷]. ..... ۶۷
- ۵-۱. نتایج نسبت مقاومت ac برای سیم آمورف  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  در حالت خام و بعد از بازیخت. ۷۵
- ۵-۲. مشخصات لایه‌نشانی‌های انجام شده. .... ۸۵

## فهرست شکل‌ها

- ۱-۲. الف). نظم اسپینی موازی در یک ماده فرومغناطیسی. (ب) آرایش اسپینی پادموازی برای یک پادفرومغناطیس. .... ۶
- ۲-۲. مثال‌هایی از آرایش‌های حوزه. (الف) یک تک حوزه با اندازه انرژی مگنتواستاتیک بزرگ. (ب) انرژی مگنتواستاتیک با تقسیم بلور به دو حوزه که مخالف هم مغناطیده هستند، نصف می‌شود. (ج) انرژی مگنتواستاتیک با تقسیم به چهار حوزه به یک چهارم می‌رسد. (د) و (ه) نمونه، انرژی مگنتواستاتیک صفر دارد. به این آرایش‌ها حوزه‌های بستاری گفته می‌شود. .... ۸
- ۳-۲. مثالی از حوزه‌هایی که مغناطش درمرز  $180^\circ$  تغییر می‌کند. (الف) یک دیواره نازک که موجب می‌شود انرژی ناهمسانگردی کمینه شود. (ب) یک دیواره ضخیم که در آن تغییر اسپین تدریجی است، و انرژی تبادل را که تمایل دارد اسپین‌ها را موازی نگه دارد، کمینه می‌کند. .... ۸
- ۴-۲. نمایش تغییرات دیواره مغناطیسی. (الف) آرایش اولیه یک فرومغناطیس. (ب) و (ج) در حضور یک میدان اعمالی، حجم حوزه‌ها با جابجا شدن دیواره‌ها و چرخیدن، تغییر می‌کند. (د) در میدان‌های به حد کافی بزرگ، فرومغناطیس اشباع می‌شود. ۹
- ۵-۲. مثالی از حلقه پسماند یک فرومغناطیس. میدان وادارندگی،  $H_{co}$ ، میدان مورد نیاز برای ایجاد مغناطش صفر در نمونه است. مغناطش پسماند،  $M_r$ ، مغناطش در میدان اعمالی صفر پس از آن که اشباع صورت گرفت، می‌باشد. .... ۹
- ۸-۲. ساختارهای حوزه مغناطیسی در سیم‌های آمورف دارای مگنتوتنگش منفی و مثبت. .... ۱۷
- ۹-۲. وابستگی منحنی‌های مغناطش به تنش در سیم‌های فلزی آمورف. اندیس‌های ۶-۱ به ترازهای مختلف تنش کششی اشاره دارند: (الف). برای ماده خام (۱)  $\alpha=0$ ، (۲)  $\alpha=83$ ، (۳)  $\alpha=180$  Mpa و (ب). برای ماده، بازپخت شده تنش/جریانی. .... ۱۸
- شکل ۱۰-۲. مقایسه تراوایی‌های اولیه و مغناطش‌های اشباع مواد مغناطیسی نرم گوناگون. .... ۲۰

- ۱-۳. اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی عرضی. نمونه نشان داده شده ضریب هال منفی دارد. جهت  $H_y$  درون صفحه است و  $I_x$  جریان سیم‌پیچ مولد  $H_y$  می‌باشد [۲۲]. ۲۳
- ۲-۳. مثال‌هایی از مقاومت مغناطیسی ناهمسانگرد در فیلم‌های پلی کریستال  $Fe$ ،  $Co$ ،  $Ni$ ،  $Ni_{81}Fe_{19}$ ،  $Ni_{70}Co_{30}$  و  $Ni_{50}Co_{50}$ . خط‌های پر و نقاط به ترتیب مربوط به میدان مغناطیسی اعمالی موازی و عمود بر جریان و در صفحه نمونه می‌باشد. ضخامت فیلم‌ها تقریباً  $100\text{nm}$  است [۲۴]. ۲۵
- ۳-۳. (الف): تغییر مقاومت چندلایه مغناطیسی به صورت تابعی از میدان مغناطیسی اعمالی. (ب): آرایش ممان‌ها (با پیکان نمایش داده شده است) در چندلایه (سه لایه) در میدان‌های مغناطیسی مختلف: در میدان صفر ممان‌ها به پادموازی هستند. وقتی میدان مغناطیسی خارجی  $H$  بزرگ‌تر از میدان مغناطیسی اشباع  $H_s$  می‌شود ممان‌ها موازی می‌شوند. (ج): منحنی مغناطش چندلایه [۲۹]. ۲۷
- ۴-۳. ساختارهای متنوعی که GMR در آن مشاهده می‌شود: (الف): چندلایه‌های مغناطیسی، (ب): شبه دریچه اسپینی، (ج): دریچه اسپینی و (د): فیلم نازک دانه‌دار. ۲۹
- ۵-۳. ترابرد الکترون در یک چندلایه که لایه‌های فرومغناطیسی متوالی آن مغناطش موازی (الف) و پادموازی (ب) دارند. ۳۲
- ۶-۳. ساختارهای نوار الکترونی (چپ) و چگالی حالات (راست)  $Cu$  (الف) و  $fcc\ Co$  برای الکترون‌های اسپین اکثریت (ب) و اسپین اقلیت (ج). ۳۶
- ۷-۳. مقاومت نرمال بر حسب میدان مغناطیسی برای تعدادی از چندلایه‌های  $Fe/Cr$  دارای جفت‌شدگی پادفرومغناطیسی در دمای  $4/2\ K$ . پیکان‌ها میدان اشباع  $H_s$  را نشان می‌دهند، میدانی که برای غلبه بر جفت‌شدگی پادفرومغناطیسی درون لایه‌ای میان لایه‌های  $Fe$  و هم‌جهت کردن مغناطش آنها لازم است [۲۶]. ۴۲
- ۸-۳. مقاومت مغناطیسی اشباع در  $4/2\ K$  بر حسب ضخامت  $Cr$  در چندلایه‌های  $Si(111)/Cr(10\text{nm})/[Fe(2\text{nm})/Cr(t)]_N/Cr(5\text{nm})$  که در دماهای مختلفی رشد داده شده‌اند: مثلث‌ها و مربع‌ها مربوط به  $30^\circ\text{C}$  - و دایره‌ها  $20^\circ\text{C}$  - [۳۰]. ۴۲

- ۳-۹. حلقه‌های پسماند MOKE (الف) و مقاومت (ب) سه لایه Co/Au/Co که ضخامت Co، ۱۰ nm و ضخامت Au بین دو لایه ۶ nm است، در دمای اتاق نشان داده شده است. دو فیلم Co میدان‌های پسماند مختلف دارند. بازه میدان مغناطیسی که مغناطش دو لایه Co پاد موازی و مقاومت کوچک است، با پیکان مشخص شده است [۳۱]. ..... ۴۴
- ۳-۱۰. منحنی مغناطش (الف) و تغییر مقاومت متناظر با آن (ب) برای دریچه اسپینی  $H_B$ . Si/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(15nm)/Cu(2/6nm)/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(15nm)/FeMn(10nm)/Ag(2nm) مغناطیسی، موازی با میدان ناهمسانگردی تبادلی ایجاد شده به وسیله FeMn اعمال شده است [۳۴]. ..... ۴۵
- ۳-۱۱. وابستگی  $\Delta R/R = [R(H) - R(H = 20kG)] / R(H = 20kG)$  به میدان مغناطیسی در فیلم‌های دانه‌دار  $Co_xCu_{1-x}$ . منحنی‌های a و b در  $T=100$  K و منحنی c در  $T=10$  K اندازه‌گیری شدند [۳۵]. ..... ۴۶
- ۳-۱۲. توصیف تصویری مدل (M-B) بایاس تبادلی. ..... ۴۸
- ۳-۱۳. هندسه مدل (M-B) برای یک سیستم دارای بایاس تبادلی. توجه کنید که مغناطش زیرشبکه AFM دو جهت پادموازی هم دارد و محورهای ناهمسانگردی FM و AFM در یک جهت فرض شده‌اند [۳۶]. ..... ۴۹
- ۳-۱۴. نمونه‌ای از حلقه‌های پسماند GMR در دریچه‌های اسپینی. نمودار (الف) میدان تبادلی، میدان وادارندگی، و تغییر مقاومت را نشان می‌دهد. (ب) اثر تسلسل را نمایش می‌دهد که بدون ثابت کردن مجدد اسپین‌ها، دو رفت و برگشت برای میدان به ترتیب وقوع، 1A، 1B، 2A و 2B گرفته شده است. به کاهش میدان تبادلی توجه کنید [۴۱]. ..... ۵۱
- ۳-۱۵. نمایی از آرایش‌های مختلف دریچه اسپینی: (الف) SV فوقانی (ب) SV تحتانی و (ج) SV دوتایی. ..... ۵۳
- ۳-۱۶. نمودار مقاومت در مقابل جریان اعمالی برای المان‌های دریچه اسپینی  $10 \mu m \times 30 \mu m$  با ساختارهای Ta/NiFe/Cu/Co/NiFe/MnNi/Ta (۵/۸/۳/۲/۶/۲۵/۵ نانومتر) و Ta/NiFe/Co/Cu/Co/NiFe/MnNi/Ta (۵/۸/۳/۲/۶/۲۵/۵ نانومتر) [۵۵]. ..... ۵۸
- ۳-۱۷. نمایی از حالت‌های صفر و یک (الف) و (ب) [۵۶]. خط تشخیص و خط ثبت در المان حافظه (ج) [۵۷]. ..... ۵۹
- ۳-۱۸. آرایش مقاومت‌های GMR در حسگر پل وتستون. متمرکزکننده‌های شار نشان داده شده‌اند: D1 و D2 به ترتیب فاصله بین متمرکزکننده‌های شار و طول متمرکزکننده شار هستند. ..... ۶۱

- ۱-۴. مدار اندازه‌گیری  $v_L$  و  $\Phi_\theta (= \int v_L dt)$  ..... ۶۸
- ۱-۵. ساختار حوزه‌های مغناطیسی درون نوار مغناطیسی آمورف. در بخش درونی حوزه‌ها جهت‌گیری محوری دارند و در بخش خارجی، جهت‌گیری حوزه‌ها درون صفحه نوار و عمود بر طول نوار مغناطیسی است. .... ۷۲
- ۲-۵. مدار مورد استفاده برای اندازه‌گیری MR در بایاس dc ..... ۷۳
- ۳-۵. چیدمان اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی [۷۱] ..... ۷۳
- ۴-۵. نسبت مقاومت ac نمونه در فرکانس ۲۵۰ kHz بعد از بازپخت. .... ۷۴
- ۵-۵. نمودارهای نسبت مقاومت ac سیم بعد از بازپخت اول. (الف) برای فرکانس ۱۰ Hz. (ب) فرکانس ۴۰ Hz. (ج) فرکانس ۶۰ Hz. (د) فرکانس ۱۰۰ Hz ..... ۷۶
- ۶-۵. نمودار نسبت مقاومت ac سیم بعد از بازپخت دوم در فرکانس‌های: (الف) ۱۰ Hz. (ب) ۲۰ Hz. (ج) ۸۰ Hz و (د) ۱۰۰ Hz ..... ۷۷
- ۷-۵. نمودار نسبت مقاومت ac سیم بعد از بازپخت سوم. برای جریان ac با فرکانس (الف) ۱۰ Hz. (ب) ۲۰ Hz و (ج) ۴۰ Hz ..... ۷۸
- ۸-۵. مدار پل وتستون ..... ۸۰
- ۹-۵. قرص کبالت و ریزدانه‌های تیتانیم درون بوته‌های گرافیتی آماده برای لایه‌نشانی به روش باریکه الکترونی ..... ۸۲
- ۱۰-۵. نمایی از محفظه لایه‌نشانی ..... ۸۴
- ۱۱-۵. دو روش اندازه‌گیری مقاومت نمونه: (الف) روش چهار اتصالی و (ب) روش دو اتصالی. .... ۸۷
- ۱۲-۵. تصویر نمونه‌های چندلایه با اتصالات الکتریکی برای اندازه‌گیری به روش چهار-اتصالی (الف). نمونه ۴-۱۳۳ با ترکیب NiO/Co/Cu/Co/Ti که در حضور میدان مغناطیسی درون صفحه لایه‌ها لایه‌نشانی شده است، (ب). نمونه ۳-۱۳۳ با ترکیب NiO/Co/Cu/Co/Ti و بدون اعمال میدان مغناطیسی لایه‌نشانی شده است، (ج). نمونه ۷-۱۳۲ با ترکیب NiO/Co/Cu/Co/Cu که در حضور میدان مغناطیسی درون صفحه لایه‌ها لایه‌نشانی شده است. .... ۸۸
- ۱۳-۵. طیف XRD از نمونه ۳-۱۳۳. قله‌های بلوری اکسید نیکل با پیکان نشان داده شده‌اند. .... ۸۹

- ۱۴-۵. تصاویر AFM گرفته شده از نمونه ۳-۱۳۳. (الف) و (ب) سطح اکسید نیکل و (ج) و (د) سطح چند لایه ..... ۹۰
- ۱۵-۵. ناهمواری‌های سطوح اکسید نیکل و چند لایه به ترتیب در (الف) و (ب) دیده می‌شود. .... ۹۰
- ۱۶-۵. منحنی (الف) مقاومت بر حسب میدان مغناطیسی. (ب) مقاومت مغناطیسی (MR) بر حسب میدان مغناطیسی برای نمونه ۴-۱۳۳. .... ۹۲
- ۱۷-۵. منحنی مقاومت مغناطیسی (MR) بر حسب میدان مغناطیسی برای نمونه ۳-۱۳۳. .... ۹۲
- ۱۸-۵. حلقه پسماند MOKE نمونه ۳-۱۳۳. .... ۹۳
- ۱۹-۵. نمودار رفت و برگشت مقاومت مغناطیسی نمونه ۳-۱۳۳. .... ۹۳

## فصل اول

### مقدمه



پس از پیشرفت تکنولوژی ساخت لایه‌های نازک و کشف اثر GMR (مقاومت مغناطیسی بسیار بزرگ)، استفاده‌های متنوعی از لایه‌های مغناطیسی شده است. امروزه لایه‌های نازک مغناطیسی اهمیت ویژه‌ای در صنایع پیشرفته از جمله الکترونیک، کامپیوتر و حسگرها دارند. ساختارهای GMR به دلیل تغییرات شدید مقاومت الکتریکی در میدان مغناطیسی و حساسیت بالا نسبت به میدان مغناطیسی، بیشتر مورد توجه می‌باشند. این ساختارها از دو بخش تشکیل می‌شوند، یک بخش مغناطیسی که از مواد فرومغناطیسی نظیر Fe، Co و Ni تشکیل می‌شود و بخش دیگر که شامل مواد غیرمغناطیسی مانند Ag، Cu و Au می‌باشد. برای بالا بردن میزان حساسیت نسبت به میدان مغناطیسی در ابعاد کوچک، ساختارهای GMR متفاوتی مورد بررسی قرار گرفتند که هر کدام دارای مزایا و معایبی بودند. ساختار دريچه اسپینی از کاربردی‌ترین ساختارهای GMR است. این ساختار هم اکنون در هد خواندن دیسک سخت و حسگرهای میدان مغناطیسی استفاده می‌شود.

هدف از کار حاضر، ساخت لایه‌های مغناطیسی با پاسخ GMR قابل اندازه‌گیری است. از میان مواد مختلفی که در ساختارهای دريچه اسپینی به کار می‌روند، کبالت و مس به دلیل تطابق نواری خوب و پاسخ GMR نسبتاً بزرگ انتخاب شدند. برای اعمال بایاس تبدلی از اکسید نیکل استفاده شد که از مواد پادفرومغناطیسی با دمای نیل نسبتاً بالا و قابل استفاده در کاربردهای صنعتی است. نمونه‌ها به روش تبخیر باریکه الکترونی لایه‌نشانی شدند. برای بهبود اثر GMR لایه‌نشانی برخی از نمونه‌ها در حضور میدان مغناطیسی انجام شد.

فلزات آمورف در مقایسه با مواد نرم بلوری، رسانندگی الکتریکی و نیروی وادارندگی کوچکی دارند. از این رو اتلاف جریان ادی و اتلاف پسماند آنها کمتر است. کاربرد اصلی این مواد در سنسورهای مغناطیسی است که از حساسیت بالای مغناطش آنها به میدان مغناطیسی، پاسخ سریع و اتلاف کم توان در این مواد استفاده می‌شود. سیم‌های مغناطیسی آمورف کبالت-پایه

مگنتوتنگش نزدیک صفر دارند. علت توجه بسیار به مواد دارای مگنتوتنگش صفر آن است که منحنی‌های مغناطش در این حالت تقریباً برگشت‌پذیر است. تلاش‌هایی برای مشاهده اثر مقاومت مغناطیسی در سیم‌ها و نوارهای آمورف کبالت-پایه انجام دادیم.

در فصل دوم به معرفی مواد فرومغناطیسی، پادفرومغناطیسی و به شکل گسترده‌تر مواد مغناطیسی نرم پرداخته می‌شود.

در فصل سوم ابتدا مفهوم مقاومت مغناطیسی را معرفی می‌کنیم و بعد به تفصیل به اثر GMR می‌پردازیم. سپس میدان بایاس تبادل و پارامترهای مهم در ساختار دریچه اسپینی بیان می‌شود. در پایان، کاربرد اثر GMR در حافظه مغناطیسی MRAM و حسگر میدان مغناطیسی آورده می‌شود.

فصل چهارم زمینه اطلاعاتی برای بخش تجربی سیم و نوار آمورف را فراهم می‌کند. با تعریف امیدانس و اندوکتانس مغناطیسی شروع می‌شود و با خلاصه تعدادی از مقالاتی که در جریان آزمایش‌ها مؤثر بودند پایان می‌یابد.

در بخش‌های اول و دوم فصل پنجم، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر نوار و سیم آمورف و تلاش‌های انجام شده برای تفکیک مقاومت خالص از داده‌های ac ارائه می‌شود. در بخش سوم به روش ساخت و لایه‌نشانی نمونه‌های چندلایه مغناطیسی و آزمایش‌های انجام شده بر آنها می‌پردازیم. در پایان نکاتی را برای ادامه کار ارائه می‌دهیم.

## فصل دوم

خواص مغناطیسی و مواد مغناطیسی نرم

در این فصل پس از معرفی مفاهیم فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و پارامترهای مغناطیسی به ویژگی‌های مواد مغناطیسی نرم می‌پردازیم و در پایان، تاریخچه‌ای از مواد مغناطیسی نرم جدید بیان می‌شود.

## ۲-۱- فرومغناطیس و پادفرومغناطیس

منشأ مغناطیس، اسپین ذاتی و ممان‌های مغناطیسی مداری الکترون است. الکترون‌ها ذرات با اسپین  $1/2$  هستند و مکانیک کوانتومی بیان می‌کند که ممان مغناطیسی اسپین روی هر محور دلخواه می‌تواند فقط دو تصویر "بالا" و "پایین" داشته باشد در نتیجه هر الکترون غیرجفت شده در اتم به اندازه یک مگنتون بوهر<sup>۱</sup>،  $\mu_B$ ، در ممان مغناطیسی کل اتم، سهم دارد. اما چگونه می‌توان این مفهوم مغناطیسی را به یک ماده حجیم تعمیم داد؟ به این پرسش بعد از معرفی مفاهیم فرومغناطیس و پادفرومغناطیس می‌پردازیم.

ماده فرومغناطیسی ماده‌ای است که در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، ممان مغناطیسی خودبخودی<sup>۲</sup> دارد. به این ممان، ممان اشباع<sup>۳</sup> نیز گفته می‌شود و بدین مفهوم است که اسپین الکترون‌ها و ممان‌های مغناطیسی به صورت منظم قرار گرفته‌اند. هرچند چینش‌های<sup>۴</sup> کاملاً پیچیده‌ای می‌توانند به ممان‌های خودبخودی بیانجامند، یک فرومغناطیس ساده‌ترین چینش را دارد و در آن همه ممان‌های مغناطیسی موازی هم قرار گرفته‌اند. این چینش در نتیجه یک برهم‌کنش داخلی معروف به برهم‌کنش تبادلی<sup>۵</sup> است، خاصیتی که با مغناطش یا ممان مغناطیسی در واحد حجم ماده متناسب است. در مقابل، پادفرومغناطیس ماده‌ای است که

<sup>۱</sup>  $\mu_B = 0.927 \times 10^{-23} \text{ J/T}$

<sup>۲</sup> spontaneous

<sup>۳</sup> Saturation moment

<sup>۴</sup> arrangement

<sup>۵</sup> Exchange field