

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش ماده چگال

بررسی ساختار سطح و بین لایه‌ای نانوجندلایه‌های  $\text{Co/Pd}$  و اثر بازپخت بر روی  
ساختار رشد و خواص مغناطیسی آنها

استاد راهنما:

دکتر امیر سید حسن روضاتیان

پژوهشگر:

کوثر شهبازی

مهر ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال خانم کوثر شهبازی

تحت عنوان

**بررسی ساختار سطح و بین لایه‌ای نانوجندلایه‌های  $Co/Pd$  و اثر بازپخت بر روی ساختار رشد و خواص مغناطیسی آنها**

در تاریخ ۳۰ مهرماه ۱۳۹۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر امیر سید حسن روضاتیان با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر ابوالقاسم نورمحمدی آبادچی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر مرتضی مظفری با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا



سپاس پروردگارم را که که مرا راهنا بود تا هر آنچه در برون می جویم، در درون بیایم. سپاس او بی را که به من آموخت بسیار نیازمندترم به پرورش روح؛ زیرا ذهن بارور و جسم ورزیده، زائیده روحی پالوده و پرورش یافته است. و سپاس همه دوستانی را که در این راه مرا همیار و همدل و هم سخن و همراه بوده اند. یارانی چون فائزه رضانی، مریم امینیان، رسول قاسمی، مهدی سیدیان، سعید مهرگان راد و... همه و همه و همه کسانی که نشان همیشه در خاطر من خواهد ماند.

و پس از پرورش روح، اندی به پرورش ذهن بایستی پرداخت که در این دوره از زندگانی ام مرا ممکن شد. و پرورش ذهن را استادانی همگام شدند که سپاس از ایشان در این مجال نمی گنجد از آنجمله اند دکتر محمد رضا سرکرده ای، دکتر امیر سید حسن روضاتیان، دکتر مرتضی مظفری، و بیش از همه سپاس از نگارش و دیدی که دکتر حمید هراتی زاده در این راه به من آموختند.

و در آخر، وجودم را بدیون خانواده ایم که همیشه دوستانم خواهم داشت و در هر نفس ساکنزارشان خواهم بود.

## چکیده

بررسی سامانه‌های مغناطیسی کم‌بعد مانند سطوح، لایه‌های نازک و چندلایه‌ای‌ها، یکی از مباحث بسیار پویا در فیزیک نوین است. این موضوع با وجود ساختارهای مغناطیسی نو و پدیده‌های جالبی که در آنها دیده شده ولی در نمونه‌های کپه‌ای آنها وجود ندارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان سامانه‌های نانوچندلایه‌ای (و به شکل ویژه ابرشبکه‌ها) کبالت‌دار به دلیل ویژگی‌های خاصی که از خود نشان می‌دهند و کاربردهای فراوانی که به همین جهت پیدا کرده‌اند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از سوی دیگر چنین پدیده‌هایی در این سامانه‌ها بیش از همه به ریخت فصل‌مشترک و مشخصه‌های ساختاری هم‌چون میزان درهم‌روی لایه‌ها در فصل مشترک، کرنش، راستای رشد و ... وابسته است. با این وصف مشخصه‌یابی ساختاری و ریخت‌شناسی این سامانه‌ها در جهت یافتن دلایل و شرایط شکل‌گیری چنین پدیده‌هایی یا از بین رفتن آنها اهمیت بسیاری دارد. در بخش نخست این پژوهش، ویژگی‌های مغناطیسی، ساختاری و هم‌چنین ریخت‌شناسی فصل‌مشترک‌های چندلایه‌ای Co/Pd (با ضخامت لایه کبالت  $14 \text{ \AA}$ ) بررسی شده‌اند. ریخت‌شناسی فصل‌مشترک با استفاده از اندازه‌گیری‌های تابش خراشان پرتو ایکس آینه‌ای و نآینه‌ای با تابش سینکروترونی و آزمایشگاهی و هم‌چنین تصویربرداری میکروسکوپی انجام گرفته است. داده‌های به‌دست‌آمده از این دو روش از جمله میزان ناهموازی، طول همبستگی افقی و پارامتر برخال محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. پراش‌سنجی پرتو ایکس زاویه بزرگ، ساختار پوش (تحمیلی) را که به شدت در راستای (111) رشد یافته است نشان می‌دهد. رابطه بین شدت و شمار دولایه‌ای‌ها بررسی و با پراکندگی پرتو ایکس خراشیده مقایسه شده است. با به‌کارگیری پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های ذکر شده مدل رشد در چنین سامانه‌هایی به دست آمد. البته در مورد نمونه‌های حاضر نشان‌دهنده شد که پارامترهای به دست آمده با هیچ‌یک از مدل‌های رشد بر پایه برخال خودمتناسب هم‌خوانی نداشته پس باید برخال بودن این سطوح مورد تردید قرار بگیرد. اندازه‌گیری‌های VSM بر روی همه‌ی نمونه‌ها، ناهمسانگردی مغناطیسی افقی را نشان می‌دهند که با پژوهش‌های دیگری که ناهمسانگردی عمودی در چندلایه‌های Co/Pd را تنها برای نمونه‌هایی با لایه کبالت کمتر از  $8 \text{ \AA}$  گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. از سوی دیگر در بسیاری از پژوهش‌ها برای بهبود ویژگی‌های مغناطیسی در چندلایه‌ای‌هایی با محور ناهمسانگردی عمودی، از بازپخت استفاده شده است. در اینجا نیز برای بهینه‌سازی ویژگی‌های مغناطیسی در چندلایه‌ای‌های دارای ناهمسانگردی مغناطیسی عمودی از بازپخت استفاده شد. مشخص شد که مغناطش بیرون‌صفحه‌ای به سمت سطح نمونه چرخیده است. افزون بر آن افزایش در وادارندگی در راستای عمودی نیز مشاهده شد.

## کلیدواژه:

نانوچندلایه‌ای‌های Co/Pd، ناهمسانگردی مغناطیسی، تابش سینکروترون، ابرشبکه، پراش پرتو ایکس، بازتاب پرتو ایکس، میکروسکوپ نیروی اتمی، ساختار رشد، بازپخت.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: درآمدی بر مغناطیس

۱-۱	درآمد	۱
۲-۱	انواع مواد مغناطیسی	۲
۱-۲-۱	منحنی‌های مغناطش و حلقه پسماند	۵
۳-۱	ناهمسانگردی مغناطیسی	۶
۱-۳-۱	ناهمسانگردی بلوری	۷
۲-۳-۱	ناهمسانگردی شکل	۹
۳-۳-۱	ناهمسانگردی مغناطوکشسانی (تنشی)	۹
۴-۳-۱	ناهمسانگردی تبادلی	۱۰
۴-۱	ناهمسانگردی مغناطیسی عمودی	۱۱
۵-۱	اهمیت پدیده‌های نوی مغناطیسی در فناوری	۱۴
۱-۵-۱	ضبط مغناطیسی	۱۴
۲-۵-۱	مقاومت مغناطیسی غول آسا (GMR) و شیرهای اسپینی	۱۸
۳-۵-۱	مقاومت تونلی مغناطیسی (TMR) و حافظه‌های مغناطومقاومتی با دسترسی تصادفی	
	(MRAM)	۲۱

### فصل دوم: مشخصه‌یابی لایه‌های نازک با پرتو ایکس

۱-۲	درآمد	۲۳
۲-۲	پراش زاویه بزرگ پرتو ایکس	۲۴
۱-۲-۲	تحلیل نمایه خطی (LPA)	۲۵
۲-۲-۲	توابع مدل و متغیرهای قله	۲۶
۳-۲-۲	پهن‌شدگی بازتاب تنها ناشی از اندازه بلورک	۳۰
۴-۲-۲	رابطه شرر	۳۱
۱-۴-۲-۲	بلورک کروی	۳۱
۲-۴-۲-۲	اشکال دیگر بلورک‌ها	۳۲
۵-۲-۲	بروز همزمان پهن‌شدگی اندازه و کرنش	۳۳

۳-۲ بازتاب پرتو ایکس (XRR).....	۳۴
۱-۳-۲ بازتاب پرتو ایکس از یک لایه روی بستره.....	۳۵
۲-۳-۲ اندازه‌گیری ضخامت.....	۳۷
۳-۳-۲ اندازه‌گیری پهنای فصل مشترک.....	۳۸
۱-۳-۳-۲ جداسازی سهم ناهمواری و درهم‌روی.....	۴۰
۲-۳-۳-۲ تقریب بورن.....	۴۱
۳-۳-۳-۲ تقریب موج تعمیم‌یافته بورن.....	۴۲
۴-۳-۲ بازتاب از ابر شبکه‌ها.....	۴۳
۱-۴-۳-۲ پراکندگی پخشی از چندلایه‌ای‌ها.....	۴۴

### فصل سوم: چندلایه‌ای‌های دارای کبالت

۱-۳ درآمد.....	۴۶
۲-۳ ویژگی‌های کلی ابر شبکه‌های دارای کبالت.....	۴۸
۱-۲-۳ ضخامت لایه کبالت.....	۴۹
۲-۲-۳ مقاومت در برابر خوردگی.....	۵۱
۳-۲-۳ ریز ساختار.....	۵۲
۳-۳ تاثیر شرایط رشد بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی چندلایه‌ای‌ها.....	۵۵
۱-۳-۳ روش انباشت.....	۵۵
۲-۳-۳ گاز انباشت.....	۵۵
۳-۳-۳ دمای انباشت.....	۵۶
۴-۳-۳ زیر لایه‌ها.....	۵۶
۴-۳ باز پخت.....	۵۶

### فصل چهارم: روش‌های تجربی

۱-۴ درآمد.....	۶۰
۲-۴ لایه‌نشانی به روش کندوپاش مغناطیسی.....	۶۰
۳-۴ اندازه‌گیری بازتاب پرتو ایکس.....	۶۳
۱-۳-۴ تابش سینکروترون.....	۶۴



۴-۴	دستگاه پراش پرتو ایکس.....	۶۶
۴-۴-۱	چشمه پرتو ایکس آزمایشگاهی.....	۶۸
۴-۵	میکروسکوپ نیروی اتمی.....	۷۰
۴-۵-۱	مدهای گوناگون AFM.....	۷۱
۴-۶	مغناطوسنج نمونه-لرزان.....	۷۲

## فصل پنجم: نتایج

۵-۱	درآمد.....	۷۴
۵-۲	بررسی نمونه‌های CO/PD با ناهمسانگردی درون صفحه‌ای.....	۷۵
۵-۲-۱	آماده‌سازی نمونه‌ها.....	۶۲
۵-۲-۲	تحلیل داده‌های پراش پرتو ایکس.....	۷۵
۵-۲-۳	تحلیل داده‌های بازتاب پرتو ایکس.....	۸۲
۵-۲-۴	تحلیل تصویرهای میکروسکوپ نیروی اتمی.....	۸۷
۵-۲-۵	تحلیل نمودارهای پسماند.....	۹۲
۵-۲-۶	نتیجه‌گیری.....	۹۲
۵-۳	بررسی اثر بازپخت بر روی چندلایه‌ای دارای ناهمسانگردی عمودی.....	۱۰۲
۵-۳-۱	شرایط رشد و بازپخت نمونه.....	۱۰۳
۵-۳-۲	تحلیل داده‌های پراش پرتو ایکس.....	۱۰۳
۵-۳-۳	تحلیل تصویرهای میکروسکوپ نیروی اتمی.....	۱۰۹
۵-۳-۴	تحلیل نمودارهای پسماند.....	۱۱۲
۵-۳-۵	نتیجه‌گیری.....	۱۱۳
۵-۴	پیشنهادها.....	۱۱۵

## پیوست

پ-۱	درآمد.....	۱۱۷
پ-۲	طبیعت آماری سطوح ناهموار.....	۱۱۹
پ-۳	مقادیر آماری مرتبه اول: تابع توزیع ارتفاع سطح و تابع مشخصه.....	۱۲۰
پ-۴	کمیت‌های آماری مرتبه دوم: تابع خودتصحیح و تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع.....	۱۲۴

- پ-۵ برآورد عددی پارامترهای ناهمواری..... ۱۳۰
- پ-۵-۱ برآورد عددی پارامترهای آماری..... ۱۳۰
- پ-۵-۱-۱ ارتفاع میانگین سطح..... ۱۳۱
- پ-۵-۱-۲ ریشه میانگین مربعی ناهمواری..... ۱۳۱
- پ-۵-۱-۳ کج‌شدگی و درجه اوج..... ۱۳۱
- پ-۵-۱-۴ تابع خودهمبسته..... ۱۳۲
- پ-۵-۱-۵ تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع..... ۱۳۲
- پ-۵-۲ استخراج پارامترهای ناهمواری از تصاویر سطحی..... ۱۳۳
- پ-۵-۲-۲ تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع..... ۱۳۳
- پ-۶ یک مثال از سطوح ناهموار تصادفی: سطوح خودمتناسب..... ۱۳۴
- منابع و مراجع..... ۱۳۹

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: گونه‌های گوناگون منحنی مغناطش برای ماده (a) وامغناطیس (b) پارامغناطیس یا پادفرومغناطیس (c) فرومغناطیس یا فری مغناطیس.....	۳
شکل ۱-۲: منحنی مغناطش و حلقه‌های پسماند (ارتفاع منحنی $M$ نسبت به $B$ اغراق شده است).....	۶
شکل ۱-۳: منحنی مغناطش آهن، کبالت و نیکل در دمای اتاق.....	۶
شکل ۱-۴: برهم‌کنش‌های اسپین-مدار-شبكة.....	۸
شکل ۱-۵: میدان وامغناطش (الف) در نبود میدان خارجی (ب) در حضور میدان خارجی.....	۹
شکل ۱-۶: انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی ضرب در ضخامت لایه کبالت بر حسب ضخامت کبالت.....	۱۲
شکل ۱-۷: وابستگی $K_{eff}$ به ضخامت لایه $t$ در حضور ناهمسانگردی سطحی نیل $K_N$ مثبت و ناهمسانگردی سطحی ناشی از کرنش $K_\lambda$ .....	۱۴
شکل ۱-۸: طرح‌وارهای از نحوه قرارگیری بیت‌ها در محیط‌های ضبط عمودی و افقی.....	۱۵
شکل ۱-۹: مقایسه محیط ضبط مغناطیسی افقی (بالا) و عمودی (پایین).....	۱۶
شکل ۱-۱۰: زیرلایه از جنس ماده نرم مغناطیسی در محیط‌های ضبط عمودی.....	۱۸
شکل ۱-۱۱: پاسخ مغناطش و مغناطومقاومت یک ساختار GMR در برابر میدان خارجی.....	۱۹
شکل ۱-۱۲: (الف) حلقه پسماند و (ب) تغییر نسبی در مقاومت برای شیر اسپینی.....	۲۰
شکل ۱-۱۳: طرح‌واره بخش اصلی از سامانه MRAM.....	۲۲
شکل ۱-۱۴: در یک سامانه MRAM آرایه‌ای دو بعدی از ساختارهای شکل ۱-۱۳ وجود دارد و به این شکل آدرس دهی به تک بیت‌ها امکان‌پذیر است.....	۲۲
شکل ۱-۲: طرح‌وارهای از چینش $\theta/2\theta$ .....	۲۴
شکل ۲-۲: (الف) بازتاب براگ از یک بلور کامل و مکان چشم‌داشتی قله براگ برای آن (ب) بازتاب براگ از یک بلور دارای کرنش همگن (پ) کرنش ناهمگن.....	۲۶
شکل ۲-۳: توابع گاوس $f_G(2\theta)$ و کوشی $f_C(2\theta)$ دارای پهنای نیم‌بیشینه و $I_0$ یکسان.....	۲۷
شکل ۲-۴: نمایش مفهوم پهنای انتگرالی.....	۲۸
شکل ۲-۵: بازتاب از لایه نازک کندوپاش شده تیتانیوم و برازش آن توسط توابع گاوس (G)، کوشی (C)، پیرسون (P)، ویت، و شبه-ویت (pV).....	۲۹
شکل ۲-۶: یک نمونه از منحنی‌های XRR که در آن به ترتیب، چگونگی بدست آمدن اولین زاویه‌حد (زاویه‌حد لایه)، دومین زاویه‌حد (زاویه‌حد بستره)، ناهمواری سطح و ضخامت نشان داده شده است.....	۳۶

- شکل ۲-۷: (الف) افزایش زاویه حد و هم‌چنین دامنه فرانژها با افزایش چگالی الکترونی لایه، (ب) افزایش دامنه فرانژها با افزایش چگالی بستره برای یک لایه ثابت. .... ۳۸
- شکل ۲-۸: اثر ضخامت بر دوره تناوب فرانژهای کایزیگ. .... ۳۸
- شکل ۲-۹: افزایش میرایی دامنه فرانژها در اثر زیاد شدن پهنای فصل مشترک. .... ۳۹
- شکل ۲-۱۰: چگالی الکترونی میانگین در راستای موازی با صفحه فصل مشترک (راست) فصل مشترک ناهموار (چپ) فصل مشترک در هم‌رفته. .... ۴۱
- شکل ۲-۱۱: بازتاب آینه‌ای از چندلایه‌ای AuFe دارای ۲۰ تکرار روی بستره MgO و برازش آن. .... ۴۳
- شکل ۲-۱۲: فصل مشترک‌های شبیه‌سازی شده (الف) تصادفی (ناهمبسته) (ب) همبسته. .... ۴۴
- شکل ۳-۱: علامت ناهمسانگردی چندلایه‌ای تشکیل شده از مواد فرورمغناطیس و فلزات واسطه اولیه بر حسب پرشدگی نوار 3d و تصحیحات لازم با در نظر گرفتن اثر فصل مشترک. .... ۴۷
- شکل ۳-۲: (راست) طرح‌واره یک چندلایه‌ای ایده‌آل Co/Pt، (چپ) تصویر سطح مقطع HRTEM از چندلایه‌ای Co/Pt. .... ۴۹
- شکل ۳-۳: حلقه پسماند برای چندلایه‌ای  $[t_{Co}+17 \text{ \AA} Pd]_{13}$ . .... ۵۱
- شکل ۳-۴: تغییر در وادارندگی و چرخش کر در چندلایه‌ای بدون پوشش  $[Co(4.8 \text{ \AA})/Pt(10.8 \text{ \AA})]$ . .... ۵۲
- شکل ۳-۵: حلقه پسماند کر قطبی چندلایه‌ای‌های Co/Pt انباشت شده با MBE در راستاهای متفاوت. .... ۵۳
- شکل ۳-۶: (راست) تصویر TEM سطح مقطع از ابرشبهه Co/Au نشان‌دهنده رشد ستونی این ابرشبهه‌ها، (چپ) طرح‌واره فرآیند اکسایش ابرشبهه دارای کبالت در اثر بازپخت در جو. .... ۵۸
- شکل ۴-۱: طرح‌واره‌ای از دستگاه کندوپاش مغناطیسی. .... ۶۱
- شکل ۴-۲: طرح‌واره‌ای از ابزار بازتاب در ایستگاه ۲.۳ داریوری، SRS. .... ۶۴
- شکل ۴-۳: (بالا) نمایی ساده شده از یک سینکروترون (دایموند، انگلستان)، (پایین) پوستر کارتونی از شتاب‌دهنده ALS در برکلی. .... ۶۵
- شکل ۴-۴: دستگاه D8 Discover. .... ۶۷
- شکل ۴-۵: (بالا) لوله کولیک، (پایین) چشمه پرتو ایکس با آند چرخشی. .... ۶۹
- شکل ۴-۶: مقایسه درخشندگی پرتو ایکس حاصل از چشمه آزمایشگاهی و انواع سینکروترون‌ها. .... ۶۹
- شکل ۴-۷: طرح‌واره‌ای از دستگاه AFM. .... ۷۰
- شکل ۴-۸: نیروی وارد بر تیرک در فاصله‌های گوناگون از سطح نمونه. .... ۷۱
- شکل ۴-۹: طرح‌واره مغناطوسنج نمونه لرزان (VSM). .... ۷۳

- شکل ۵-۱: نمایی از ساختار چندلایه‌های ها ..... ۶۲
- شکل ۵-۲: الگوی پراش پرتو ایکس برای Nهای متفاوت ..... ۷۶
- شکل ۵-۳: برازش قله چندلایه‌ای برای نمونه ۱۶ دولایه‌ای با توابع گاوس، کوشی، پیرسون و شبه-ویت ..... ۷۷
- شکل ۵-۴: قله‌های ماهواره‌ای اطراف قله چندلایه‌ای ..... ۸۰
- شکل ۵-۵: الگوی بازتاب آینه‌ای پرتو ایکس برای شمار دولایه‌ای‌های متفاوت ..... ۸۳
- شکل ۵-۶: الگوی پراکندگی پخشی طولی برای شمار دولایه‌ای‌های متفاوت ..... ۸۳
- شکل ۵-۷: الگوی ساختاری استفاده شده برای شبیه‌سازی داده‌های پراکندگی آینه‌ای و پخشی ..... ۸۴
- شکل ۵-۸: الگوی بازتاب آینه‌ای و ناآینه‌ای پرتو ایکس از نمونه‌های ۱۰، ۲۶ و ۳۰ دولایه‌ای به همراه برازش الگوی آینه‌ای با طول موج  $\lambda = 1.393 \text{ \AA}$  ..... ۸۵
- شکل ۵-۹: الگوی بازتاب آینه‌ای و ناآینه‌ای پرتو ایکس از نمونه‌های ۸ و ۱۶ دولایه‌ای به همراه برازش الگوی آینه‌ای با طول موج  $\lambda = 1.3 \text{ \AA}$  ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰: تصویر سه‌بعدی AFM برای نمونه ۲۶ دولایه‌ای در مقیاس  $1 \times 1 \text{ \mu m}$  ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۱: تصویر AFM نمونه ۶ دولایه‌ای (راست) و نمونه ۲۶ دولایه‌ای (چپ) در مقیاس  $3 \times 3 \text{ \mu m}$  ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۲: خراش‌های کج روی نمونه‌ها برای ۶، ۸ و ۱۶ دولایه‌ای ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۳: خراش‌های عمیق روی نمونه‌ها که همگی در راستای روبش (راستای x) هستند، برای مثال در ۶ و ۱۶ دولایه‌ای ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۴: نمودار پسماند (راست) ۶ دولایه‌ای و (چپ) ۳۰ دولایه‌ای ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۵: اندازه دانه بدست آمده به وسیله برازش با توابع متفاوت ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۶: افزایش شدت قله چندلایه‌ای و قله ماهواره‌ای مرتبه ۱- با شمار دولایه‌ای‌ها ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۷: مقایسه ضخامت دولایه‌ای بدست آمده از الگوهای XRD و XRR ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۸: تغییر فاصله قله‌های براگ در الگوی XRR نشان از تغییر ضخامت دولایه‌ای دارد ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۹: تحلیل الگوهای XRR و XRD هر دو افزایش ناهموازی با شمار دولایه‌ای را نشان می‌دهند ..... ۹۶
- شکل ۵-۲۰: اندازه دانه برای نمونه‌هایی با شمار دولایه‌ای‌های متفاوت ..... ۹۷
- شکل ۵-۲۱: طول همدوسی برون صفحه‌ای بر حسب شمار دولایه‌ای‌ها ..... ۹۷
- شکل ۵-۲۲: طول همدوسی درون صفحه‌ای بر حسب شمار دولایه‌ای‌ها ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۳: رفتار طول همبستگی درون سطحی با ضخامت (شمار دولایه‌ای) ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۴: رفتار پهنای فصل مشترک با ضخامت پشته، به دست آمده از الگوی XRR و تصاویر AFM ..... ۱۰۱

- شکل ۵-۲۵: مقایسه الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های متفاوت ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۶: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها به همراه قله‌های مورد انتظار در آنها ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۷: برازش قله چندلایه‌ای برای نمونه بازپخت نشده ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۸: برازش قله چندلایه‌ای برای نمونه بازپخت شده در جو (بالا) و در خلا (پایین) ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۹: تصاویر AFM با اندازه  $5 \times 5 \mu\text{m}$  برای نمونه‌های متفاوت ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۰: میانگین ناهمواری سطح  $\sigma$ ، پهنای فصل مشترک  $\omega$  برای تصاویر AFM ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۱: طول همبستگی درون صفحه‌ای  $\xi$  و نمای ناهمواری  $\alpha$  برای تصاویر AFM ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۲: نمودار پسماند افقی و عمودی نمونه بازپخت نشده ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۳: نمودار پسماند افقی و عمودی نمونه بازپخت شده در جو ..... ۱۱۳
- شکل پ-۱: اثر تفکیک‌پذیری دستگاه اندازه‌گیری ..... ۱۱۸
- شکل پ-۲: سه سطح ناهموار متفاوت با RMS ناهمواری گوناگون ..... ۱۲۱
- شکل پ-۳: دو سطح ناهموار متفاوت با RMS ناهمواری،  $\omega$  یکسان و تابع توزیع ارتفاع،  $h(r)$  متفاوت ..... ۱۲۳
- شکل پ-۴: تابع توزیع ارتفاع با کج‌شدگی مثبت و منفی ..... ۱۲۳
- شکل پ-۵: نمونه‌ای از توابع توزیع ارتفاع با درجه اوج‌های متفاوت ..... ۱۲۴
- شکل پ-۶: نمایه سطوحی با RMS ناهمواری  $\omega$  یکسان و طول همبستگی افقی  $\xi$  متفاوت ..... ۱۲۵
- شکل پ-۷: تابع خودهمبسته برای نمایه سطح‌های شکل پ-۶ ..... ۱۲۷
- شکل پ-۸: نمونه‌هایی از دو سطح کاملاً متفاوت با  $\omega$  و  $\xi$  یکسان ..... ۱۲۹
- شکل پ-۹: تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع سطوح شکل پ-۶ ..... ۱۳۰
- شکل پ-۱۱: مولفه‌های مش‌کردن تصویر ..... ۱۳۳
- شکل پ-۱۲: سطوح ناهموار با  $\omega$  و  $\xi$  همانند ولی نمای ناهمواری  $\alpha$  متفاوت ..... ۱۳۶
- شکل پ-۱۳: نمودار log-log تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع مربوط به یک سطح خودمتناسب ..... ۱۳۶
- شکل پ-۱۴: توابع مشخصه سطوح خودمتناسب در ۱+۲ بعد: الف) تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع  $H(r)$  (ب) تابع خودتصحیح  $R(r)$  ..... ۱۳۷

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

- جدول ۱-۱: محورهای آسان، متوسط، و سخت بلور مکعبی با توجه به بازه ثابت‌های ناهمسانگردی بلوری ..... ۸
- جدول ۱-۲: پهنای انتگرالی ۴ گونه از معمول‌ترین توابع مدل در تحلیل نمایه خطی ..... ۳۰
- جدول ۲-۲: ثابت‌های شرر  $K_s$  برای چندگونه از بلورک‌ها ..... ۳۲
- جدول ۱-۳: مقادیر تجربی ثابت ناهمسانگردی سطحی  $K_s$ ، ثابت ناهمسانگردی حجمی  $K_v$  و ضخامت گذار. ۵۴
- جدول ۱-۵: تفاوت اندازه دانه بدست آمده به وسیله برازش با توابع متفاوت ..... ۷۸
- جدول ۲-۵: تفاوت ریزکرنش بدست آمده به وسیله برازش با توابع متفاوت ..... ۷۹
- جدول ۳-۵: مقدار ضخامت دولایه‌ای  $\Lambda(\text{Å})$  که با استفاده از مکان قله‌های ماهواره‌ای محاسبه شده‌اند ..... ۸۱
- جدول ۴-۵: داده‌های ساختاری بدست آمده از الگوی XRD ..... ۸۲
- جدول ۵-۵: داده‌های به‌دست آمده از الگوی بازتاب آینه‌ای و پراکندگی پخشی پرتو ایکس ..... ۸۷
- جدول ۶-۵: پارامترهای حاصل از تصاویر AFM در مقیاس  $1 \times 1 \mu\text{m}$  ..... ۸۸
- جدول ۷-۵: پارامترهای حاصل از تصاویر AFM در مقیاس  $3 \times 3 \mu\text{m}$  ..... ۸۸
- جدول ۸-۵: پارامترهای حاصل از تصاویر AFM در مقیاس  $5 \times 5 \mu\text{m}$  ..... ۸۸
- جدول ۹-۵: نماهای مقیاس‌بندی به‌دست آمده از روی الگوی XRR ..... ۱۰۰
- جدول ۱۰-۵: مقادیر نماهای جهانی برای مدل‌های رشد متفاوت سطوح خودمتناسب ..... ۱۰۲
- جدول ۱۱-۵: مقدار ضخامت دولایه‌ای  $\Lambda(\text{Å})$  ..... ۱۰۹
- جدول ۱۲-۵: داده‌های ساختاری بدست آمده از الگوی XRD ..... ۱۰۹
- جدول پ-۱: توابع خودهمبسته متفاوت برای سطوح همسانگرد ..... ۱۲۸

## فهرست کوتاه‌نوشت‌ها

AES	Auger Electron Spectroscopy
AFM	AntiFerroMagnetic
AFM	Atomic Force Microscope
AMR	Anisotropic MagnetoResistance
BMP	Bit Patterned Media
DRAM	Dynamic Random Access memory
DWBA	Distorted Wave Born Approximation
EDS	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
EW	Edwards-Wilkinson
FM	FerroMagnetic
FWHM	Full Width at Half Maximum
GID	Grazing Incidence Diffraction
GIXRD	Grazing Incidence X-Ray Diffraction
GMR	Giant Magneto Resistance
HAXRD	High Angle X-Ray Diffraction
KPZ	Kardar-Parisi-Zhang
LINAC	Linear Accelerator
LPA	Line Profile Analysis
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MFM	Magnetic Force Microscopy
MRAM	Magnetoresistance Random Access Memory
MTJ	Magnetic Tunneling Junction
OMR	Ordinary MagnetoResistance
PMA	Perpendicular Magnetic Anisotropy
RAM	Random Access Memory
RD	Random Deposition
RDSR	Random Deposition with Surface Relaxation
RE-TM	Rare-Earth Transition-Metal
S/N	Signal to Noise
SFD	Narrow Switching Field Distribution
SRAM	Static Random Access Memory
SRS	Synchrotron Radiation Source
TAB	Tang-Alexander-Bruinsma
TEM	Transmission Electron Microscopy
TMR	Tunneling MagnetoResistance
VSM	Vibrating Sample Magnetometer
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction
XRR	X-Ray Reflectivity



## فصل اول

### درآمدی بر مغناطیس

#### ۱-۱ درآمد

به دلیل پاسخ پسماندگونه مواد مغناطیسی به میدان مغناطیسی بیرونی، حالت‌های مغناطیسی دوتایی به آسانی می‌توانند برای انبار اطلاعات دیجیتال به کار برده شده و توسط میدان بیرونی وارد شده از یکی به دیگری تغییر حالت دهند. با مواد گسترده‌ای که در دسترسند و روش‌های سنتزی که به سرعت پیشرفته تر می‌شوند، مواد مغناطیسی تبدیل به یکی از مهم‌ترین محیط‌های ضبط داده شده‌اند. انبار آنالوگ صدا اولین کاربرد این روش بود. در قرن پیش قطعات ضبط کننده گوناگونی که مواد مغناطیسی را به عنوان محیط ضبط داده به کار می‌بردند، اختراع شدند، از جمله می‌توان از نوار مغناطیسی و لوح‌های سخت مغناطیسی نام برد که داده‌های آنالوگ یا دیجیتال را ضبط می‌نمودند. با افزایش هر چه بیشتر سرعت تولید داده در جهان امروزی، تقاضای رو به افزایشی برای توانایی ضبط با چگالی بیشتر ایجاد شده است [۱].

در دو دهه اخیر ساختارهای چندلایه‌ای مغناطیسی دارای Co و یک فلز نجیب به خاطر ویژگی‌های عجیب مغناطیسی خود، علاقه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. برای مثال ابرشبکه‌هایی مانند Co/Ag جفت‌شدگی پادرومغناطیس بین‌لایه‌ای دارند و اثر مغناطومقاومت غول‌آسا از خود نشان می‌دهند [۲]، در صورتی که ساختارهای چندلایه‌ای مانند Co/Pd، Co/Pt، و Co/Ni به خاطر ناهمسانگردی عمودی بالا و تنظیم‌شدنی

آنها، برای کاربرد در حافظه مغناطیسی با دسترسی تصادفی<sup>۱</sup>، بیت‌های الگودار مغناطیسی<sup>۲</sup> و اسپینترونیک مورد کاوش قرار گرفته‌اند [۳]. به شکل ویژه، چندلایه‌های (Co/Pd)<sub>N</sub> مقادیر زیاد ناهمسانگردی مغناطیسی را نشان می‌دهند و در نتیجه در محیط‌های ضبط عمودی و بیت‌های الگودار کاربرد دارند. به همین جهت در این فصل مروری خواهیم داشت بر انواع مواد مغناطیسی و ناهمسانگردی‌های مغناطیسی و سپس چند کاربرد به‌روز چنین سامانه‌هایی را معرفی می‌کنیم.

## ۲-۱ انواع مواد مغناطیسی

اتم‌ها دارای الکترون‌های زیادی هستند که هر کدام در مدار خود و دور خود می‌چرخند. گشتاور مغناطیسی مربوط به هر کدام از این حرکات یک کمیت برداری است، یکی عمود بر صفحه مداری و دیگری موازی با محور اسپینی. گشتاور مغناطیسی اتم، جمع برداری همه گشتاورهای الکترونی آن است و دو امکان در اینجا به وجود می‌آید [۴]:

گشتاور مغناطیسی الکترون‌ها به گونه‌ای است که همدیگر را خنثی کرده و هیچ گشتاور باقیمانده‌ای وجود نخواهد داشت، و اتم به طور کلی دارای هیچ گشتاوری نخواهد بود. این شرایط به دیامغناطش خواهد انجامید. خنثی‌سازی گشتاورهای مغناطیسی پاره‌ای بوده و اتم دارای گشتاور مغناطیسی باقیمانده‌ای خواهد بود. چنین اتمی معمولاً به عنوان اتم مغناطیسی شناخته می‌شود. موادی از این دست مواد پارا-، فرو-، پادفرو- و فری-مغناطیس را می‌توان نام برد.

مغناطش برای هوا صفر، برای مواد دیامغناطیس خیلی کوچک و منفی، برای پارامغناطیس و پادفرومغناطیس‌ها خیلی کوچک و مثبت و برای مواد فرو و فری‌مغناطیس بزرگ و مثبت می‌باشد [۴]. ولی ویژگی‌های مغناطیسی ماده تنها به علامت  $M$  بستگی نداشته و به گونه تغییرات  $M$  با  $H$  نیز بستگی دارند، نسبت بین این دو، پذیرفتاری خوانده می‌شود [۴]

$$\chi = \frac{M}{H} \frac{emu}{Oe \text{ cm}^3} \quad (1-1)$$

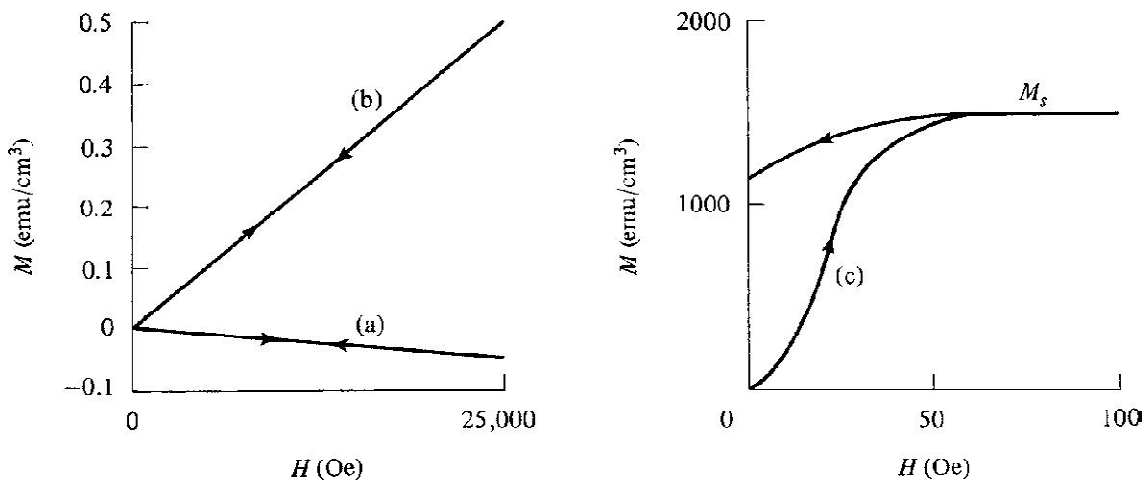
$\chi$  در واقع بدون بعد است زیرا  $M$  دارای بعد  $\text{A.cm}^2/\text{cm}^3$  بوده و  $H$  دارای بعد  $\text{A/cm}$  است. از آنجا که  $M$  گشتاور مغناطیسی در واحد حجم می‌باشد،  $\chi$  نیز پذیرفتاری حجمی می‌باشد [۴].

<sup>۱</sup> Random Access Memory (RAM)

<sup>۲</sup> Bit patterned media (BMP)

مواد دیا-، پارا- و پادافرومغناطیس در شرایط عادی منحنی‌های  $M-H$  خطی داشته و با از بین رفتن میدان، به حالت غیرمغناطیسی برمی‌گردند. برای مواد فرومغناطیس و فری‌مغناطیس  $\chi$  با  $H$  تغییر می‌کند و یک مقدار بیشینه خواهد داشت (شکل ۱-۱). در این منحنی‌ها چند پدیده را می‌بینیم:

- اشباع: در مقدارهای بزرگ  $H$  مغناطش  $M$  به مقدار اشباع  $M_s$  رسیده و ثابت می‌ماند.
- پسماند یا بازگشت‌ناپذیری<sup>۱</sup>: پس از اشباع، کاهش  $H$  تا صفر  $M$  را به صفر نمی‌رساند. در نتیجه مواد فرو و فری‌مغناطیس می‌توانند به مغناطیس‌های دائمی تبدیل شوند.



شکل ۱-۱: گونه‌های گوناگون منحنی مغناطش برای ماده (a) دیامغناطیس (b) پارامغناطیس یا پادافرومغناطیس (c) فرومغناطیس یا فری‌مغناطیس [۴]

در واقع پذیرفتاری تنها برای مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس که در آنها مقدار آن از  $H$  مستقل است (مگر در دماهای بسیار پایین و یا میدان‌های بسیار بالا)، اندازه‌گیری و گزارش می‌شود [۴]. منحنی‌های  $B$  به  $H$  هم وجود دارند. اگرچه  $M$  پس از رسیدن به اشباع ثابت می‌ماند،  $B$  به طور خطی تغییر می‌کند. به طور همانند، نسبت  $B$  به  $H$  تراوایی خوانده می‌شود، که بدون بعد است:

$$\mu = \frac{B}{H} = 1 + 4\pi\chi \quad (2-1)$$

معمولا تراوایی برای مواد مغناطیسی نرم گزارش می‌شود ولی در هر صورت به دو دلیل پارامتر مهمی محسوب می‌شود. یکی اینکه تراوایی به شدت با میدان وارده تغییر می‌کند، و مواد مغناطیسی نرم تقریبا هیچ-وقت با میدان ثابت به کار برده نمی‌شوند، و دیگر اینکه تراوایی شدیداً به ساختار، خلوص ماده، عملیات

<sup>۱</sup> Hysteresis or irreversibility

حرارتی و واپیچش<sup>۱</sup> وابسته است. می‌توان رفتار مغناطیسی مواد گوناگون را با مقدار  $\chi$  و  $\mu$  آنها دسته‌بندی نمود:

- فضای خالی: از آنجا که هیچ ماده‌ای برای مغناطیده شدن نیست:  $\chi = 0$  و  $\mu = 1$
- $(\mu_{air} = 1,00000037)$
- دیامغناطیس:  $\chi$  کوچک و منفی،  $\mu$  کمی کمتر از یک
- پارامغناطیس و پادفرومغناطیس:  $\chi$  کوچک و مثبت و  $\mu$  کمی بیشتر از یک
- فرومغناطیس و فری مغناطیس:  $\chi$  و  $\mu$ ، بزرگ ( $\mu$  چندصد تا چند هزار) و مثبت و هر دو تابع  $H$  (در واقع به دلیل  $\mu$  کم هوا می‌توانیم بگوییم در هوا  $B=H$  است)

اگر یک میدان مغناطیسی تقریباً هیچ اثر ماکروسکوپی در ماده نداشته باشد، می‌توان گفت ماده غیرمغناطیسی ( $|\chi| \ll 1$ ) است [۵]. در واقع دیامغناطیس ماده‌ای است که مغناطش منفی از خود نشان می‌دهد و معمولاً از اتم‌هایی تشکیل شده است که هیچ مغناطش باقیمانده‌ای ندارند. به طور معمول الکترون‌هایی که در پوسته‌های بسته دور اتم قرار دارند دارای جهت‌گیری مداری و اسپینی‌ای هستند که هیچ گشتاور باقیمانده‌ای نخواهند داشت و دیامغناطیس هستند [۴]. مواد دیامغناطیس مهم گازهای نجیب، نیم‌رساناها، آب، و بسیاری فلزها (مانند Cu, Zn, Ag, Cd, Au, Hg, Pb, Bi) هستند [۵].

ماده پارامغناطیس تشکیل شده از اتم‌ها یا مولکول‌هایی است که همه آنها دارای گشتاور مغناطیسی باقیمانده  $\mu$  همانندی هستند، زیرا همه گشتاورهای مداری و اسپینی آنها خنثی نشده است. در غیاب میدان مغناطیسی وارده، این گشتاورهای مغناطیسی جهت‌های اتفاقی داشته و یکدیگر را خنثی می‌کنند، در نتیجه مغناطش نمونه صفر خواهد بود. هنگام اعمال میدان هر گشتاور اتمی تمایل دارد در راستای میدان قرار گیرد؛ اگر هیچ نیروی مخالفی وجود نداشته باشد هم‌راستایی کاملی در راستای میدان به وجود خواهد آمد و اتم گشتاور بزرگی در این راستا خواهد داشت. ولی آشفته‌گی گرمایی اتم‌ها با این تغییر جهت مخالفت نموده و تمایل دارد گشتاورها را در راستای پیشین نگاه دارد. نتیجه هم‌راستایی پاره‌ای در راستای میدان وارده خواهد بود و در نتیجه پذیرفتاری مثبت کوچکی خواهیم داشت. با افزایش دما، تمایل به تصادفی بودن راستاها را افزایش داده و در نتیجه پذیرفتاری کاهش می‌یابد [۴]. به عنوان مثال، بسیاری از گازها (مانند اکسیژن)، کربن و شماری از فلزها (Mg, Al, Ti, V, Mo, Pd, Pt) پارامغناطیس هستند [۵].

ماده جامد در حالت خاصی از نظم اتم‌های همسایه ویژگی جالبی را از خود بروز می‌دهد: مغناطش خودبه‌خود. گشتاورهای اتمی (معمولاً گشتاورهای اسپینی) ممکن است به دلیل برهم‌کنش کوانتوم-مکانیکی تبدیلی، در راستای موازی (فرومغناطیس) یا پادموازی (پادفرومغناطیس) قرار بگیرند. فری مغناطیس ماده‌ای با

<sup>۱</sup> Deformation