

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم ہے:

پدر، مادر، ہمسر
پ

و فرزند انم؛ رضا و آوا

(از طرف: علی قاسمی)

تقدیم ہے:

پدر و مادر عزیزم
پ

(از طرف: تہمینہ سوہالی)

لایه‌های نازک مغناطیسی

گردآوری و تدوین:

دکتر علی قاسمی

مهندس تهمینه سودایی

سرشناسه:	قاسمی، علی، ۱۳۵۶ - گردآورنده
عنوان و نام پدیدآور:	لایه‌های نازک مغناطیسی/گردآوری و تدوین علی قاسمی، تهمینه سودایی.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری:	ن، ۷۲۰ ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول.
شابک:	۹-۱۵-۷۷۳۶-۶۰-۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.
موضوع:	لایه‌های نازک.
موضوع:	نوارهای مغناطیسی.
موضوع:	مواد مغناطیسی.
شناسه افزوده:	سودایی، تهمینه، گردآورنده.
شناسه افزوده:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
رده‌بندی کنگره:	۱۳۹۴ ق ۲ / ۴۱۸/۹ TA
رده‌بندی دیویی:	۶۲۱/۳۸۱۵۲
کتابشناسی ملی:	۴۰۸۲۴۱۵



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دانشکده مهندسی مواد

عنوان کتاب: لایه‌های نازک مغناطیسی
تدوین و گردآوری: علی قاسمی
ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد: فریناز عسگری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه‌آرایی رایانه‌ای: امین پژوهش جهرمی
ویراستار ادبی: امین پژوهش جهرمی
شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ: اول، زمستان ۹۴
قیمت: ۳۲۰۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7736-15-9

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز فناوری اطلاعات و مدیریت دانش،

مدیریت انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

پیش‌گفتار

با توجه به گسترش روزافزون حجم اطلاعات در زندگی بشر، قرن بیست و یکم قرن اطلاعات ترابیتی (10^{12} بیت) نام‌گذاری شده است. در این عصر اطلاعات، دانش‌ها و یافته‌های بشر به اندازه‌ای است که ذهن انسان می‌تواند در برگیرنده بخش کوچکی از آن باشد. در واقع توان علمی انسان بستگی به توانایی دستیابی و استفاده از دریای عظیم اطلاعات دارد. به این منظور، حافظه‌هایی به کار می‌روند که وظیفه ذخیره‌سازی و نگهداری دائمی برنامه‌ها و اطلاعات را بر عهده دارند و دسترسی مستمر به آن‌ها سریع و آسان است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که حافظه‌های امروزی قابلیت ذخیره‌سازی حدود یک ترابیت بر اینچ مربع داده دارند. از آنجایی که عمل خواندن و نوشتن بیت‌ها روی حافظه‌های مغناطیسی توسط هد انجام می‌شود، کاهش فاصله بین هد و سطح لوح^۱، استفاده از هد خواندنی^۲ با حساسیت بالا و هد نوشتنی^۳ با مغناطش بالا می‌تواند در چگونگی عملکرد حافظه‌های مغناطیسی با چگالی بالا بسیار موثر باشد. از این رو، لایه مغناطیسی به کار رفته در هد مغناطیسی باید از مغناطش اشباع بسیار بالا و نفوذپذیری مغناطیسی بزرگ به منظور ایجاد میدان مغناطیسی قوی و نیروی پسماندزا کوچک برخوردار باشد. در حقیقت، جریان عبوری از سیم‌پیچ هد، مولد میدان مغناطیسی خواهد بود که موجب مغناطیده شدن بیت‌ها و نوشتن آن بر سطح لوح خواهد شد.

¹ Disk

² Read head

³ Write head

محیط ذخیره اطلاعات به شکل لایه نازک است و بر سطح زیر لایه غیرمغناطیسی قرار می‌گیرد. هد ذخیره‌کننده، یک ماده مغناطیسی حلقه‌ای دارای شکاف است که در مجاورت بسیار نزدیک سطح لایه قرار می‌گیرد. زمانی که هد، اطلاعات را روی حافظه ثبت می‌کند، میدان مغناطیسی ایجاد شده در شکاف، لایه نازک را مغناطیده می‌کند. در حالت عادی فرآیند ذخیره‌سازی به دلیل حلقه پسماند، غیرخطی است. در حالت ساده مغناطش ذخیره‌شده الگویی از میدان خارجی و داخلی تشکیل می‌دهد که شبیه مجموعه‌ای از آهنرباهای دائمی هستند. هنگامی که این الگوها از مقابل هد با سرعت مشخصی عبور می‌کنند، شار مغناطیسی که از این الگوها ناشی می‌شود، توسط هسته هد دریافت می‌شود و به تناسب سرعت تغییرات این شارها، ولتاژی در سیم پیچ القا می‌شود. این ولتاژ منحصر به فرد است و توسط فرآیند الکتریکی مناسب سیگنال‌هایی را تشکیل می‌دهند.

مغناطیس‌های دائمی¹ نیز جزء جدانشدنی از فناوری پیشرفته هستند و در میان مواد مغناطیسی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. از حوزه‌های کاربردی این مغناطیس‌ها می‌توان به استفاده در موتورها، ژنراتورها، بلندگوها و محرک‌ها اشاره کرد. در حال حاضر، توسعه مغناطیس‌های دائمی از مهم‌ترین و جذاب‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی است. بدیهی است که افزایش حداکثر انرژی مغناطیس‌ها با افزایش نیروی پسماندزا و مغناطش اشباع میسر می‌شود. به این منظور، از ناهمسان‌گردی مغناطیسی بسیار بزرگ مواد سخت می‌توان برای افزایش نیروی پسماندزا استفاده کرد. با این وجود، مقادیر کم مغناطش اشباع این مواد در مقایسه با مواد نرم سبب کاهش حداکثر انرژی می‌شود. از این رو، نیاز به یافتن مواد مغناطیسی جدید با بیش‌ترین نیروی پسماندزا و مغناطش اشباع احساس می‌شود. تحقیقات اخیر نشان

¹ Permanent magnet

داده است که استفاده از ترکیبات بین‌فلزی نادر خاکی- فلزات انتقالی¹ و یا ترکیبات نیتريد و بورايد آنها نظير $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ، $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ و $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ می‌تواند دست‌یابی به این هدف را تسهیل بخشد.

کتاب حاضر چهارمین اثر مولف در حوزه مواد مغناطیس است. در سه مجموعه پیشین، نظریه‌های مغناطیس در مواد توده‌ای و نانومغناطیس‌ها و رفتار مواد جاذب امواج الکترومغناطیس مطالعه و بررسی گردیده و در این کتاب تلاش شده درک عمیقی از کاربرد لایه‌های نازک مغناطیسی در حافظه‌های دارای چگالی بالای عمودی، هدهای خواندنی و نوشتنی و مغناطیس‌های تبدلی ارتجاعی ارائه شود. رفتار مغناطیسی و ویژگی‌های ساختاری مواد مغناطیسی مهم از قبیل آهن پلاتین، نئودمیوم آهن بور، ساماریوم کبالت، تربیوم آهن کبالت، آهن کبالت و نانوکامپوزیت‌های مواد سخت و نرم مغناطیسی به تفصیل بیان شده است.

کتاب لایه‌های نازک مغناطیسی، مشتمل بر هشت فصل است. تمام فصول به رفتار مغناطیسی لایه‌های نازک می‌پردازد. در فصل نخست مقدمه‌ای بر رفتار منحنی‌های پسماند، انواع حالت‌های مغناطیسی، متغیرهای منحنی پسماند، حافظه‌ها، و هدهای مغناطیسی به اختصار معرفی شده است. یکی از مهم‌ترین مواد مغناطیسی با ساختار ابرشبکه، آلیاژ آهن پلاتین است که ویژگی‌های ساختاری و رفتار مغناطیسی آن به-عنوان یک نامزد مهم در حافظه‌ها با ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری عمودی در فصل دوم بررسی می‌شود. نقش زیرلایه، لایه بافر و عوامل موثر بر فرآیند پراکنش در تشکیل لایه نازک غیربلوری تربیوم آهن کبالت در فصل سوم مشخص شده است. این ماده در حافظه‌های مغناطیسی نسل‌های آینده کاربرد فراوانی خواهد داشت؛ به‌گونه‌ای که با کنترل سرعت چرخش حوزه‌های مغناطیسی در این لایه غیربلوری نیازی به استفاده از موتورهای الکتریکی در لوح‌های فشرده سخت نخواهد بود. نقش عنصر

¹ Rare earth- transition metal intermetallic

تریوم در خواص مغناطیسی این لایه و چگونگی تغییر حالت از ماده نرم به سخت مغناطیسی در این فصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مواد مغناطیسی که در صنایع کشور کاربرد بسیار زیادی دارد، آلیاژ نئودمیوم آهن بور است. لایه نازک این ترکیب می‌تواند در ساخت حافظه‌ها و مغناطیس‌های تبدیلی ارتجاعی که مولد انرژی هستند بسیار کاربرد داشته باشد. فصل چهارم به بررسی رفتار لایه نازک نئودمیوم آهن بور می‌پردازد. با توجه به اهمیت نئودمیوم آهن بور، این فصل با جزئیات و حجم بیشتری نگارش شده است. نقش انواع لایه‌های میانی، ضخامت، دمای آنیل، نوع زیرلایه، ترکیب شیمیایی، و لایه‌های محافظ در ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نئودمیوم آهن بور به دقت مطالعه شده است. یکی دیگر از مغناطیس‌های مهم نادر خاکی ساماریوم کبالت است که انواع مختلفی از این مغناطیس در صنایع استفاده می‌شود. فصل پنجم به معرفی رفتار مغناطیسی لایه‌های نازک ساماریوم کبالت پرداخته است. با توجه به اهمیت زیاد لایه بافر در تشکیل فاز ساماریوم کبالت و جلوگیری از خوردگی و نفوذ متقابل عناصر زیرلایه و لایه مغناطیسی، بخش زیادی از این فصل به معرفی و مقایسه انواع لایه‌های بافر مناسب می‌پردازد. یکی دیگر از قسمت‌های مهم لوح‌های فشرده، هد مغناطیسی است. هدهای مغناطیسی در سه دهه گذشته به صورت توده‌های مغناطیسی ساخته و به بازار عرضه می‌شدند. در سال‌های اخیر لایه‌های نازک مغناطیسی آهن کبالت در لایه‌های با مغناطومقاومت بسیار بزرگ جایگزین هدهای قدیمی شد. فصل ششم به معرفی رفتار هد مغناطیسی آهن کبالت می‌پردازد که بیش‌ترین مصرف بازار جهانی را به خود اختصاص داده است. در این فصل نقش عناصر آلیاژی و لایه میانی در تشکیل لایه آهن کبالت با دقت بیشتری مطالعه شده است. لازم به ذکر است که در کتاب «مقدمه‌ای بر نانومغناطیس‌ها در مواد چگال» (که از جمله تألیفات مولف حاضر است) انواع لایه‌های نازک مغناطومقاومت شامل مغناطومقاومت ناهمسان‌گرد، مغناطومقاومت بزرگ و فوق‌العاده بزرگ با قوانین

فیزیکی حاکم به‌دقت به رشته تحریر درآمده است و علاقه‌مندان به این حوزه می‌توانند با مراجعه به کتاب مذکور اطلاعات ارزشمندی کسب نمایند. در فصل هفتم به بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی پرمالوی و عوامل موثر بر مشخصه‌های ساختاری و مغناطیسی آن پرداخته شده است. از لایه‌های نازک پرمالوی در ساخت هد مغناطیسی، حسگرهای مغناطیسی، یوک‌های الکترومغناطیسی، کنداکتورهای مغناطیسی و استحفاظ مغناطیسی برای انسداد و انعکاس امواج مغناطیسی به کار گرفته می‌شود. فصل آخر این کتاب کاربرد دیگری از لایه‌های نازک را معرفی می‌کند. مغناطیس‌های تبادلی ارتجاعی که از ترکیب لایه‌های سخت و نرم مغناطیسی ایجاد می‌شوند، انرژی زیاد در حجم کم را تولید می‌کنند که در میکروالکترونیک و اسپینترونیک بسیار بااهمیت است. تعداد قابل توجهی از این مغناطیس‌ها به‌همراه روابط فیزیکی حاکم بر آن‌ها در این فصل ارائه شده و سازوکارهای افزایش انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است.

منابع و مراجع مورد استفاده در نگارش این کتاب عمدتاً شامل مقالات معتبر در مجلات علمی پژوهشی و کتاب‌های محققین معروف این حوزه است. تلاش شده بیش‌تر از مقالات محققان با شهرت بین‌المللی استفاده شود که نتایج آن‌ها مورد توافق قرار گرفته است.

امید است این متن برای استادان محترم، دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته‌های مهندسی مواد و فیزیک ماده چگال و سایر محققان این رشته‌ها مفید واقع شود.

دکتر علی قاسمی

شهریورماه نود و چهار

فهرست مطالب

۳	فصل نخست: حافظه و هد مغناطیسی
۳	مقدمه
۳	۱-۱- انواع مواد مغناطیسی
۹	۲-۱- انواع حالت‌های مغناطیسی
۱۰	۱-۲-۱- دیامغناطیس
۱۰	۲-۲-۱- پارامغناطیس
۱۲	۳-۲-۱- فرومغناطیس
۱۳	۴-۲-۱- پادفرومغناطیس
۱۳	۵-۲-۱- فری مغناطیس
۱۴	۳-۱- حلقه پسماند مغناطیسی
۱۹	۴-۱- حوزه‌های مغناطیسی
۲۰	۵-۱- برهمکنش‌های مغناطیسی و ایزوله کردن دانه‌ها
۲۱	۶-۱- سازوکار مغناطش
۲۲	۱-۶-۱- حرکت دیواره حوزه‌ها
۲۲	۲-۶-۱- چرخش همدوس
۲۳	۷-۱- چگالی سطحی حافظه‌ها و حد پایداری حرارتی
۲۴	۸-۱- حافظه‌های مغناطیسی
۳۲	۹-۱- مبانی علمی هدهای مغناطیسی
۳۶	۱-۹-۱- معادلات الکتریکی در مدارهای مغناطیسی

۳۷	۱-۹-۲- مدار هد مغناطیسی
۳۹	۱-۹-۳- القاوری هد مغناطیسی
۴۳	۱-۹-۴- تقریب کارلکوئیست
۴۶	۱-۱۰- طراحی و ساخت هدهای مغناطیسی
۴۷	۱-۱۰-۱- هدهای مغناطیسی پرمالوی
۴۹	۱-۱۰-۲- هدهای مغناطیسی فریتی
۵۳	۱-۱۰-۳- هدهای مغناطیسی با شکاف فلزی
۵۸	۱-۱۰-۴- هدهای مغناطومقاومت
۶۰	۱-۱۰-۵- هدهای مغناطیسی ترکیبی
۶۲	مراجع
۶۷	فصل دوم: لایه‌های نازک آهن پلاتین
۶۷	۲-۱- مقدمه
۶۸	۲-۱- نمودار فازای آهن- پلاتین
۷۰	۲-۲- ساختار کریستالی فازهای Fe-Pt
۷۲	۲-۳- نظم شیمیایی بلند برد
۷۵	۲-۴- خواص زیرلایه و لایه نازک
۷۵	۲-۴-۱- اثرات زیر لایه‌ها و لایه‌های بافر بر ساختار آهن پلاتین
۹۵	۲-۴-۲- تاثیر ترکیب شیمیایی بر لایه نازک آهن پلاتین
۹۸	۲-۴-۳- تاثیر پارامترهای رسوب دهی بر لایه نازک آهن پلاتین
۱۰۶	۲-۴-۴- تاثیر آنیل کردن لایه‌های نازک بر لایه نازک آهن پلاتین
۱۱۶	۲-۴-۵- تاثیر اضافه کردن بور
۱۱۸	۲-۴-۶- تاثیر تنش بر استحاله منظم شدن
۱۲۰	۲-۵- تاثیر پارامترهای مختلف بر خواص مغناطیسی لایه نازک آهن پلاتین
۱۲۲	۲-۶- تاثیر زیرلایه و لایه‌های بافر مختلف بر ویژگی‌های ساختاری و رفتار مغناطیسی ...

۱۳۷.....	۷-۲- تاثیر فشار اولیه محفظه بر دمای منظم شدن.....
۱۴۰.....	۸-۲- تاثیر درجه حرارت رسوب دهی بر خواص مغناطیسی.....
۱۴۵.....	۹-۲- تاثیر آنیل لایه‌های نازک آهن پلاتین بر رفتار مغناطیسی.....
۱۵۶.....	۱۰-۲- تاثیر ضخامت لایه نازک بر ویژگی‌های ساختاری و خواص مغناطیسی.....
۱۶۶.....	۱۱-۲- تاثیر ترکیب شیمیایی بر خواص مغناطیسی.....
۱۶۸.....	۱۲-۲- لایه‌های نازک آهن پلاتین الگودار شده.....
۱۷۳.....	مراجع.....
۱۸۱.....	فصل سوم: لایه‌های نازک تریوم کبالت.....
۱۸۱.....	مقدمه.....
۱۸۱.....	۱-۳- لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۰۴.....	۲-۳- نقش لایه بافر و لایه محافظ در رفتار مغناطیسی لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۰۵.....	۱-۲-۳- تاثیر تنگستن بر رفتار مغناطیسی لایه تریوم- آهن- کبالت.....
۲۰۹.....	۲-۲-۳- تاثیر نیتريد تیتانیم بر رفتار مغناطیسی لایه تریوم- آهن- کبالت.....
۲۱۴.....	۳-۲-۳- تاثیر نقره بر رفتار مغناطیسی لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۱۷.....	۴-۲-۳- اثر آلومینیم بر رفتار مغناطیسی لایه تریوم- آهن- کبالت.....
۲۲۶.....	۵-۲-۳- تاثیر لایه‌های بافر مغناطیسی بر لایه تریوم- آهن- کبالت.....
۲۲۷.....	۶-۲-۳- تاثیر لایه بافر بر ساختار مغناطیسی لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۳۰.....	۳-۳- ارزیابی رفتار میکروسکوپی لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۳۱.....	۱-۳-۳- تاثیر ساختار مغناطیسی بر مغناطومت لایه تریوم- آهن- کبالت.....
۲۳۷.....	۲-۳-۳- تاثیر لایه بافر بر سازوکار چرخش بردار مغناطش.....
۲۴۲.....	۳-۳-۳- چگالی جریان بحرانی در لایه‌های تریوم- آهن- کبالت.....
۲۴۸.....	۴-۳-۳- مغناطیس زدایی لایه تریوم- آهن- کبالت و تاثیر آن بر ساختار مغناطیسی.....
۲۵۰.....	۵-۳-۳- مشخصه‌های ویژه لیزر در حافظه‌های مغناطیسی تریوم- آهن- کبالت.....
۲۵۵.....	مراجع.....

فصل چهارم: لایه‌های نازک نئودیمیوم آهن بور..... ۲۶۱

۲۶۱..... مقدمه

۲۶۱..... ۱-۴- لایه‌های نئودیمیم- آهن - بور

۲۶۸..... ۲-۴- ویژگی‌های ساختاری نئودیمیم - آهن- بور و کاربرد لایه نازک مغناطیسی

۲۷۰..... ۱-۲-۴- ساختار کریستالی نئودیمیم - آهن - بور

۲۷۱..... ۲-۲-۴- نمودار فازی نئودیمیم - آهن - بور

۲۷۲..... ۳-۲-۴- مغناطیس فزری تبدلی

۲۷۳..... ۳-۴- تاثیر پارامترهای فرآیند بر رفتار مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۲۷۴..... ۱-۳-۴- تاثیر لایه بافر و لایه محافظ بر خواص مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۲۷۴..... ۱-۱-۳-۴- تاثیر لایه بافر و لایه محافظ دیسپروسیم بر رفتار مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۲۷۹..... ۲-۱-۳-۴- تاثیر لایه‌های تیتانیوم، تانتالوم، نیوبیم، مولیبدن، کروم، وانادیوم بر رفتار مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۲۹۱..... ۲-۳-۴- تاثیر ضخامت لایه بافر و لایه محافظ بر خواص مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۲۹۸..... ۳-۳-۴- تاثیر دمای لایه بافر بر خواص مغناطیسی لایه نئودیمیم - آهن - بور

۳۰۶..... ۴-۳-۴- تاثیر دمای زیر لایه بر خواص مغناطیسی و ساختاری لایه نئودیمیم- آهن- بور

۳۲۳..... ۴-۴- تاثیر پارامترهای لایه مغناطیسی بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک نئودیمیم- آهن- بور

۳۲۴..... ۱-۴-۴- تاثیر ضخامت لایه نئودیمیم- آهن- بور بر خواص مغناطیسی و ساختاری

۳۵۴..... ۱-۴-۴- تاثیر ترکیب لایه بر خواص مغناطیسی و ساختاری لایه نئودیمیم - آهن - بور

۳۶۳..... ۲-۴-۴- تاثیر دمای آنیل بر خواص مغناطیسی و ساختاری لایه نئودیمیم - آهن - بور

۳۸۷..... ۳-۴-۴- تاثیر عناصر آلیاژ بر خواص مغناطیسی و ساختاری لایه نئودیمیم - آهن - بور

۴۰۲..... مراجع

فصل پنجم: لایه‌های نازک ساماریوم کبالت ۴۱۱.....

مقدمه ۴۱۱.....

۱-۵- تاثیر پارامترهای موثر فرآیند کندوپاش بر تشکیل لایه ساماریوم کبالت ۴۱۲.....

۲-۵- رشد لایه‌های نازک $SmCo_5$ با ناهمسان‌گردی طولی ۴۲۱.....

۳-۵- رشد لایه‌های نازک $SmCo_5$ با ناهمسان‌گردی عمودی ۴۳۸.....

۴-۵- رشد لایه‌های $SmCo_5$ بر لایه Cu/Ta ۴۴۸.....

۵-۵- رشد لایه‌های $SmCo_5$ روی لایه بافر Cu/W , Cu/Ti ۴۶۳.....

۶-۵- لایه‌های نازک $SmCo_5$ با ناهمسان‌گردی عمودی انباشت شده روی لایه‌های میانی آلیاژ نیکل ۴۶۷.....

۷-۵- رشد لایه $SmCo_5$ روی لایه‌های نیکل تنگستن ۴۷۶.....

مراجع ۴۸۵.....

فصل ششم: لایه‌های نازک آهن کبالت ۴۹۱.....

مقدمه ۴۹۱.....

۱-۶- مقدمه‌ای بر لایه‌های نازک آهن کبالت ۴۹۱.....

۲-۶- پارامترهای موثر بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه‌های آهن کبالت ۴۹۳.....

۱-۲-۶- نقش زیرلایه در رفتار ساختاری و مغناطیسی لایه‌های آهن کبالت ۴۹۳.....

۲-۲-۶- نقش لایه بافر در رفتار ساختاری و مغناطیسی لایه‌های آهن کبالت ۵۰۶.....

۱-۲-۲-۶- تاثیر لایه بافر کبالت بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت ۵۰۶.....

۲-۲-۲-۶- تاثیر لایه بافر مس بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت ۵۱۹.....

۳-۲-۲-۶- تاثیر لایه‌های بافر آلومینیم، پالادیم و پلاتین بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت ۵۲۲.....

۴-۲-۲-۶- تاثیر لایه‌های بافر هافنیم، کروم، نقره و طلا بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت ۵۲۵.....

۵۲۸.....	۳-۶- مشخصه‌های ویژه لایه مغناطیسی آهن کبالت
۵۲۸..	۱-۳-۶- تاثیر ترکیب شیمیایی بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
۵۳۲.....	۲-۳-۶- تاثیر ضخامت بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
۵۳۷.....	۳-۳-۶- تاثیر تعداد لایه‌ها بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
۵۴۱.....	۴-۳-۶- تاثیر افزودن کاتیون‌های مختلف بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه آهن کبالت
۵۵۲.....	۴-۶- مشخصه‌های ویژه رسوب لایه‌های نازک آهن کبالت
۵۵۲.....	۱-۴-۶- تاثیر روش لایه نشانی بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
.....	۲-۴-۶- تاثیر مشخصه‌های فرآیند پراکنش بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
۵۵۴.....	کبالت
۵۶۰.....	۳-۴-۶- تاثیر دمای تشکیل رسوب بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن کبالت
۵۶۴.....	مراجع

۵۷۱ فصل هفتم: لایه‌های نازک پرمالوی

۵۷۱.....	مقدمه
۵۷۲.....	۱-۷- خواص ساختاری
۵۸۰.....	۲-۷- خواص مکانیکی
۵۸۱.....	۳-۷- مقاومت به اکسیداسیون
۵۸۴.....	۴-۷- مقاومت به خوردگی
۵۸۵.....	۵-۷- خواص مغناطیسی
۵۸۵.....	۱-۵-۷- نفوذپذیری مغناطیسی پرمالوی
۵۸۹.....	۲-۵-۷- نمودار پسماند و وادارندگی
۶۰۴.....	۶-۷- مغناطومقاومت و مقاومت الکتریکی
۶۱۴.....	۷-۷- مگنتواستریکشن
۶۲۰.....	۸-۷- پارامتر میرایی
۶۲۵.....	۹-۷- تشدید فرومغناطیس

۶۲۹.....	۱۰-۷- کاربردهای پرمالوی
۶۲۹.....	۱-۱۰-۷- میکروموتورها.....
۶۳۰.....	۲-۱۰-۷- استحفاظ مغناطیسی
۶۳۲.....	۳-۱۰-۷- هدهای مغناطیسی
۶۳۳.....	۴-۱۰-۷- حسگرهای مغناطیسی
۶۳۴.....	۵-۱۰-۷- هسته تراستفورماتور.....
۶۳۶.....	مراجع.....
۶۴۳.....	فصل هشتم: مغناطیس‌های تبادلی ارتجاعی
۶۴۳.....	مقدمه
۶۴۴.....	۱-۸- مقدمه‌ای بر مغناطیس‌های با خاصیت ارتجاعی
۶۵۰.....	۲-۸- مشخصه‌های ویژه مغناطیس‌ها با خاصیت ارتجاعی
۶۵۱.....	۱-۲-۸- نقش زیرلایه در چگونگی عملکرد مغناطیس‌های ارتجاعی
۶۵۷.....	۲-۲-۸- نقش لایه بافر و لایه محافظ در ویژگی‌های مغناطیس‌های ارتجاعی
۶۵۸.....	۳-۲-۸- نقش لایه‌های مغناطیسی در رفتار مغناطیس‌های ارتجاعی
۶۵۹.....	۱-۳-۲-۸- تاثیر ترکیب شیمیایی لایه بر رفتار مغناطیسی لایه‌های سخت/ نرم
۶۶۸.....	۲-۳-۲-۸- تاثیر تعداد لایه‌ها بر رفتار مغناطیسی لایه‌های سخت/ نرم
۶۷۲.....	۳-۳-۲-۸- تاثیر ضخامت لایه بر رفتار مغناطیسی لایه‌های سخت/ نرم
۶۹۲.....	۳-۸- مشخصه‌های انباشت مغناطیس‌های با خاصیت ارتجاعی
۶۹۲.....	۱-۳-۸- تاثیر مشخصه‌های فرآیند پراکنش بر رفتار مغناطیسی لایه‌های سخت/ نرم
۶۹۴.....	۲-۳-۸- تاثیر دمای تشکیل انباشت بر رفتار مغناطیسی لایه‌های سخت/ نرم
۷۰۹.....	مراجع.....
۷۱۳.....	جدول اختصارات
۷۱۷.....	واژه‌نامه

فصل نخست

حافظه و هد مغناطیسی

لایه‌های نازک مغناطیسی

فصل نخست: حافظه و هد مغناطیسی

مقدمه

در ابتدای این فصل به معرفی پارامترهای مغناطیسی مورد استفاده در کتاب مانند نیروی پسماندزا^۱، مغناطش اشباع^۲، مغناطش باقی مانده^۳ پرداخته می شود. انواع مواد و حالات مغناطیسی به اختصار مورد معرفی قرار می گیرند و در انتها حافظه های مغناطیسی طولی و عمودی با تفصیل بررسی می گردند. انواع حافظه های مغناطیسی به منظور ذخیره سازی اطلاعات استفاده می گردند. تحقیقات علمی درباره این گروه از نانومغناطیس ها به افزایش چگالی اطلاعات در واحد سطح حافظه متمرکز شده است، به گونه ای که به تدریج حافظه های عمودی جایگزین حافظه های مغناطیسی طولی شدند. فرآیند خواندن و نوشتن اطلاعات در حافظه ها توسط هدهای مغناطیسی انجام می شود. در حال حاضر مهم ترین هدهای مغناطیسی به صورت لایه های نازک طراحی و ساخته می شوند.

۱-۱- انواع مواد مغناطیسی

اکسید آهن

ماده مغناطیسی اکسید آهن Fe_3O_4 (مگنتایت) یکی از نخستین موادی بود که بشر کشف کرد. این ماده از لحاظ مغناطیسی بسیار ضعیف اما مقاومت بالایی در برابر

¹ Coercivity

² Saturation magnetization

³ Remanence magnetization

وامغناطش دارد. حضور سنگ آهن یا مگنتایت در کنار سایر فازهای مغناطیسی در اکثر فرآیندهای تولید به اثبات رسیده است [۱].

فولاد کربنی

در قرن هجدهم میلادی رفتار مغناطیسی در فولادها مشاهده شد. این فولادها هنگامی که با تنگستن یا کروم آلیاژ می‌شوند باعث رسوب کاربید می‌گردند. افزودن این عناصر باعث می‌شود که حرکت حوزه‌های مغناطیسی مشاهده شود. این ماده دارای مغناطش اشباع بزرگی است که به مراتب قوی‌تر از سنگ آهن می‌باشد ولی در برابر وامغناطیده کردن قدرت چندانی ندارند [۱].

آلنیکو

این ماده مغناطیسی با روش‌های متالورژی پودر و ریخته‌گری تهیه می‌شود و عناصر تشکیل‌دهنده آن شامل آلومینیم، نیکل، کبالت، آهن به همراه مس و تیتانیم می‌باشد. این ماده خواص فرومغناطیسی داشته و در ساخت مغناطیس‌های دائمی استفاده فراوانی دارد. رفتار مغناطیسی این ماده اغلب توسط ناهمسان‌گردی در شکل، کنترل می‌شود و به دلیل دمای کوری بالا ($\sim 850^{\circ}\text{C}$) موارد استفاده فراوانی دارد [۱].

فریت‌های سخت (فریت استرانسیوم و فریت باریوم)

این فریت‌ها در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به ساختار بلوری و وجود ناهمسان‌گردی مغناطوبلوری بالا در آنها، نیروی پسماندزا نسبتاً بالا و انرژی تولیدی کم است. هزینه طراحی و ساخت این مواد بسیار کم و به همین دلیل دارای کاربردهای زیادی هستند [۱].

ساماریوم کبالت

در اواسط دهه هفتاد میلادی ترکیب مغناطیسی ساماریوم کبالت با ناهمسان‌گردی مغناطیسی تک‌محوره به دنیا معرفی شد. عنصر اصلی این ترکیب ساماریوم است که از

عناصر نادر خاکی‌ها می‌باشد. این گروه از ترکیبات شامل عناصر آهن، کبالت و یک فلز سبک نادر خاکی می‌باشد. این ترکیب می‌تواند به‌عنوان حافظه مغناطیسی و هم‌چنین مغناطیس‌های پرانرژی استفاده شود. لکن از معایب این ترکیب مقاومت به خوردگی ضعیف و گران‌قیمت بودن آن‌ها است. پایداری حرارتی این مواد بسیار بالا است و به همین دلیل می‌توان در دماهای بالا از آن‌ها استفاده نمود [۱].

نئودیمیوم آهن بور

در سال ۱۹۸۳ مغناطیس نئودیمیوم آهن بور به دنیا معرفی شد که یکی از مغناطیس‌های دائمی نادر خاکی است. این ماده دارای مغناطش اشباع بسیار بالا و مقاومت خوب در برابر وامغناطش است. با توجه به گرانی عنصر ساماریوم، در بسیاری از صنایع، ترکیب نئودیمیوم آهن بور جایگزین ساماریوم کبالت به‌عنوان یک مغناطیس پرانرژی گردید. این مغناطیس با دمای کوری پایین (حدود 312°C) باعث شده است تا کاربرد آن در دماهای بالا محدود گردد. اما در فناوری مینیاتوری کردن مواد مغناطیس از این ترکیب به وفور استفاده می‌شود [۱].

نیتريد ساماریوم آهن

این ترکیب دارای مقاومت بسیار زیاد در برابر وامغناطش است. مقاومت به خوردگی بالا و مغناطش اشباع زیاد از جمله مزایای این مغناطیس می‌باشد. استفاده از آن در دماهای بالا نیز پیشنهاد می‌شود [۱].

آهن کبالت

این ترکیب با فرمول $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$ دارای مغناطش اشباع بسیار زیاد و نیروی پسماند کوچکی است و می‌تواند به‌صورت لایه نازک به‌عنوان هد مغناطیسی استفاده شود [۱].

آهن - نیکل (پرمالوی)

آلیاژ پرمالوی Fe-50Ni و سوپرمالوی Fe-80Ni دارای حداقل نیروی پسماندزا و حداکثر مقدار مغناطش اشباع است و می‌تواند به‌عنوان هد مغناطیسی و حفاظ‌های الکترومغناطیس استفاده شوند [۱].

تریوم آهن کبالت

این ماده مغناطیسی دارای رفتار فری مغناطیس است و اتم‌های تریوم، آهن و کبالت دارای گشتاور مغناطیسی هستند. این ترکیب به‌عنوان یک انتخاب جدید برای ساخت حافظه‌های مغناطیسی پرچگالی معرفی شده است و در آن کنترل سرعت حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی با اعمال جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. تریوم آهن کبالت دارای یک ترکیب و دمای جبران شده است که رفتار مغناطیسی ماده را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱].

فریت‌های نرم

این دسته از مواد سرامیکی دارای فرمول کلی MFe_2O_4 است که در آن M یک کاتیون دوظرفیتی می‌باشد. به جز فریت کبالت با ترکیب $CoFe_2O_4$ سایر فریت‌های اسپینلی دارای رفتار نرم هستند و از آن‌ها می‌توان در ساخت هد مغناطیسی استفاده کرد. مهم‌ترین ترکیبات این گروه فریت نیکل روی و فریت منگنز روی است [۱].

روابط حاکم بر مواد مغناطیسی

در حال حاضر دو نوع شامل نظام SI و CGS برای مواد مغناطیسی استفاده می‌شود. هنگامی که میدان مغناطیسی H به یک ماده اعمال می‌شود، رفتار ماده باعث تولید القاء مغناطیسی یا B می‌شود. ارتباط بین B و H بستگی به خصوصیات ماده دارد. در محیط آزاد و پاره‌ای از مواد، ارتباط B با H به‌صورت خطی است اما در اکثر ترکیبات این

فصل نخست: حافظه و هد مغناطیسی ♦ ۷

ارتباط پیچیده است. در نظام‌های SI و cgs ارتباط بین B ، H و M به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$B = \mu_0 (H+M) \quad 1-1$$

$$B = H + 4\pi M \quad 2-1$$

در روابط فوق M مغناطش ماده است که بستگی به گشتاور مغناطیسی اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌های موجود در ماده و برهم‌کنش بین دو قطبی‌ها دارد. به طور کلی مغناطش جمع گشتاورهای مغناطیسی در واحد حجم است.

$$M = \frac{m}{v} \quad 3-1$$

در رابطه ۱-۱ پارامتر μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد است و مقدار آن $\frac{H}{m} \times 10^{-7} \times 4\pi$ است. در حالت کلی نفوذپذیری مغناطیسی عبارت است از:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad 4-1$$

این پارامتر نشان می‌دهد که چه میزان میدان مغناطیسی می‌تواند درون ماده نفوذ کند. اگر ماده مقدار زیادی چگالی شار را در خود حفظ کند دارای نفوذپذیری بالایی است. در نظام cgs نفوذپذیری فضای آزاد برابر با واحد است و بنابراین در روابط ظاهر نمی‌شود. در جدول ۱-۱، واحدهای B ، H و M برای سلسله‌های SI و cgs مشخص گردیده است.

پارامتر دیگری که اهمیت قابل توجهی دارد پذیرفتاری^۱ مغناطیسی است که با χ نمایش داده می‌شود و نسبت بین مغناطش و میدان مغناطیسی است.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad 5-1$$

این پارامتر نیز بیانگر عملکرد ماده در حین اعمال میدان مغناطیسی است.

¹ Susceptibility

جدول ۱-۱- ارتباط بین پارامترهای مغناطیسی در نظام‌های SI و CGS [۱]

پارامتر	نظام CGS	نظام SI	فاکتور تبدیل (CGS to SI)
القاه مغناطیسی (B)	G	T	10^{-4}
میدان اعمالی (H)	Oe	A/m	$10^3/4\pi$
مغناطش (M)	emu/cm ³	A/m	10^3
مغناطش ($4\pi M$)	G	-	-
قطبش مغناطیسی (J)	-	T	-
مغناطش ویژه (s)	emu/g	J/(Tkg)	1
نفوذپذیری (μ)	بدون واحد	H/m	$4\pi \times 10^{-7}$
نفوذپذیری نسبی (μ_r)	-	بدون واحد	-
پذیرفتاری (χ)	emu/(cm ³ Oe)	بدون واحد	4π
حداکثر انرژی تولید شده (BH_{max})	MGOe	kJ/m ³	$10^2/4\pi$

$Wb = J = \text{Joule}$, $A = \text{Ampere}$, $T = \text{Tesla}$, $Oe = \text{Oersted}$, $G = \text{Gauss}$

$H = \text{Henry}$, $Weber$

می‌توان به سادگی نفوذپذیری مغناطیسی را به پذیرفتاری توسط روابط ذیل در نظام‌های SI و CGS ارتباط داد.

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad ۶-۱$$

$$\mu = 1 + 4\pi\chi \quad ۷-۱$$

قطبش^۱ مغناطیسی (J) نیز نشان‌دهنده شدت مغناطش (I) است و توسط رابطه زیر به مغناطش ارتباط پیدا می‌کند [۲ و ۳]:

$$J = \mu_0 M \quad ۸-۱$$

^۱ Polarization

۱-۲- انواع حالت‌های مغناطیسی

تمام مواد را می‌توان با توجه به رفتار مغناطیسی آنها و میزان پذیرفتاری مغناطیسی به پنج دسته تقسیم کرد. این پنج دسته شامل مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری مغناطیس است. لازم به ذکر است که اگر ابعاد ذرات از یک حد بحرانی کوچک‌تر شود، حالت‌های دیگر از قبیل سوپراپارامغناطیس^۱ و اسپین گلاس^۲ نیز ایجاد می‌شود. شکل ۱-۱ حالت مغناطیسی عناصر مختلف را در جدول تناوبی نشان می‌دهد:

1 H																	2 He
		فرومغناطیس										پادفرومغناطیس					
		پارامغناطیس										دیامغناطیس					
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	

شکل ۱-۱- جدول تناوبی نشان‌دهنده حالت مغناطیسی عناصر مختلف [۱].

حالت‌های دیامغناطیس^۳، پارامغناطیس^۱، فرومغناطیس^۲ و پادفرومغناطیس^۳ عناصر مختلف در دماهای اتاق به خوبی در جدول معین شده است. دو حالت غالب که

^۱ Superparamagnet

^۲ Spin glass

^۳ Diamagnetism

بیش‌ترین گروه عناصر را به خود اختصاص داده‌اند شامل دیامغناطیس و پارامغناطیس است که اغلب به مواد غیرمغناطیسی شناخته شوند. مهم‌ترین عناصر فرومغناطیس آهن، کبالت و نیکل هستند. حالت فری مغناطیس در عناصر خالص وجود ندارد بلکه در ترکیباتی از قبیل فریت‌ها یا تریوم آهن کبالت مشاهده می‌شود. در ادامه یکی از انواع حالت‌های مغناطیسی به اختصار بیان می‌شود.

۱-۲-۱- دیامغناطیس

مواد دیامغناطیس از اتم‌هایی تشکیل شده‌اند که گشتاور ندارند؛ زیرا تمام لایه‌های اوربیتال آن‌ها پر و الکترون جفت نشده وجود ندارد. تمام گازهای نجیب دیامغناطیس هستند؛ زیرا لایه‌های الکترونی آن‌ها کاملاً پر است. هنگامی که میدان مغناطیسی بر این مواد اعمال نشود، میزان مغناطش صفر است، اما با اعمال میدان مغناطیسی، مغناطش در خلاف جهت اعمال میدان ایجاد می‌شود. پذیرفتاری مغناطیسی این مواد منفی و بسیار ضعیف است. مشخصه دیگر این مواد این است که پذیرفتاری مغناطیسی وابستگی به دما ندارد. بسیاری از ترکیبات از قبیل کوارتز، CaCO_3 و آب جزء این گروه هستند. برخی از عناصر مثل طلا و نقره نیز در این دسته قرار دارند.

۱-۲-۲- پارامغناطیس

در مواد پارامغناطیس برخی از اتم‌ها یا یون‌ها دارای گشتاور مغناطیسی هستند؛ زیرا الکترون‌های جفت نشده در اوربیتال‌های آن‌ها وجود دارد. گشتاور مغناطیسی این گروه از مواد به صورت بسیار ضعیفی به یکدیگر جفت شده‌اند که باعث نوسانات حرارتی در جهت‌گیری کاتوره‌ای گشتاورهای مغناطیسی می‌شود. با اعمال میدان

¹ Paramagnetism

² Ferromagnetism

³ Antiferromagnetism

مغناطیسی در یک راستای مشخص تعدادی از گشتاورها با میدان هم‌جهت می‌شوند و مغناطش و پذیرفتاری مثبت در ماده ایجاد می‌گردد اما با حذف میدان مغناطش صفر می‌شود. در نمک‌های فلزات انتقالی هر کاتیون فلزی دارای گشتاور مغناطیسی است اما آنیون‌ها در فضای بین کاتیون‌ها واقع می‌شوند و در نتیجه برهمکنش‌های مغناطیسی بین کاتیون‌ها ضعیف است. نمک‌های عناصر نادر خاکی نیز به علت وجود الکترون‌های جفت نشده در اوربیتال f به صورت پارامغناطیس هستند. لازم به ذکر است که در بالاتر از دمای کوری مواد فرومغناطیس تبدیل به پارامغناطیس می‌شوند؛ زیرا انرژی حرارتی به اندازه کافی نسبت به ناهمسان‌گردی مغناطیسی قوی‌تر است [۴].

تئوری‌های مختلفی برای مواد پارامغناطیس وجود دارد که هر کدام برای دسته خاصی از این مواد کاربرد دارند. به عنوان مثال مدل لانژوین^۱ در موادی برقرار است که الکترون‌های آن با یکدیگر برهم‌کنش ندارند. در این مواد اتم‌ها دارای گشتاور مغناطیسی هستند اما به دلیل وجود انرژی حرارتی به صورت کاتوره‌ای جهت‌گیری می‌شوند. با افزایش دما، نوسانات حرارتی زیاد و جهت‌گیری اسپین‌ها مشکل می‌شود که در نتیجه پذیرفتاری مغناطیسی کاهش می‌یابد. این رفتار به قانون کوری شناخته می‌شود و توسط رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad 9-1$$

که در این رابطه C ثابت کوری نامیده می‌شود. در واقع قانون کوری حالتی از قانون کلی‌تر کوری-ویس است که در آن پذیرفتاری مغناطیسی با دما دارای رابطه زیر است:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta} \quad 10-1$$

¹ Langevin

که در این رابطه θ ثابت دمایی است و می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. هنگامی که $\theta = 0$ باشد قانون کوری-ویس به قانون کوری تبدیل می‌شود. اگر θ غیر صفر باشد برهم‌کنش مغناطیسی در بین همسایگان وجود دارد و ماده، در بالای دمای مشخص به صورت پارامغناطیس رفتار می‌کند. در شرایطی که θ مثبت باشد ماده در کمتر از دمای بحرانی به صورت فرومغناطیس است؛ و اگر $\theta < 0$ باشد ماده کمتر از دمای نیل پادفرومغناطیس است. مدل پارامغناطیس پائولی نیز در حالتی معتبر است که الکترون‌ها آزاد و با یکدیگر برای تشکیل یک نوار هدایت برهم‌کنش دارند. این مدل تئوری ساختار نواری الکترون‌های جمعی را به خوبی بیان می‌کند.

۱-۲-۳- فرومغناطیس

این حالت هنگامی ایجاد می‌شود که برهم‌کنش مغناطیسی بین گشتاورهای همسایه بسیار قوی باشد. در این مواد برهم‌کنش‌های با نیروی تبادلی بین اسپین‌های همسایه ایجاد می‌شود و باعث می‌گردد که گشتاورها در یک شبکه کریستالی به صورت موازی یا پادموازی قرار گیرند. نیروهای تبادلی بسیار قوی و در مرتبه $1000T$ می‌باشد و در مقیاسه، 10^6 میلیون برابر قوی‌تر از میدان مغناطیس زمین می‌باشند.

نخستین بار این اثر در سال ۱۹۰۷ توسط ویس^۱ و تحت عنوان میدان مولکولی مواد فرومغناطیس معرفی شد. ویس نشان داد که اجسام مغناطیسی از حوزه‌هایی تشکیل یافته‌اند که در آن‌ها گشتاور مغناطیسی اتم‌ها موازی می‌باشند. نحوه حرکت و جابه‌جایی این حوزه‌ها نشان می‌دهد که چگونه با اعمال میدان، مواد رفتار مغناطیسی پیدا می‌کنند.

در مواد فرومغناطیس به دلیل بالا بودن قدرت برهم‌کنش تبادلی و هم‌راستا شدن اسپین‌ها، حتی در غیاب میدان مغناطیسی، مغناطش بالایی وجود دارد. هرچند که در مواد فرومغناطیس قدرت برهم‌کنش ابر تبادلی بسیار بالا است اما با افزایش دما، انرژی

¹ Weiss