

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال

**کاربرد مستقیم سلسنتین برای تهیه پودرهای نانومتری فریت استرانسیوم و بررسی اثر
اندازه ی ذرات بر ویژگی های مغناطیسی آنها**

استادان راهنما:

دکتر مرتضی مظفری

دکتر جمشید عمیقیان

پژوهشگر:

احسان دوهنده

مهر ماه ۱۳۸۸

کلیه حقوق مادی مترتب 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 نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال آقای احسان دوهنده

تحت عنوان

کاربرد مستقیم سلسنتین برای تهیه پودرهای نانومتری فریت استرانسیوم و بررسی اثر

اندازه ی ذرات بر ویژگی های مغناطیسی آنها

در تاریخ ۱۳۸۸/۷/۲۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی . به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر مرتضی مظفری با مرتبه ی علمی استادیار

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر جمشید عمیقیان با مرتبه ی علمی استادیار

۳- استاد داخل گروه دکتر امیر سید حسن روضاتیان با مرتبه ی علمی استادیار

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر محمد حسن یوسفی با مرتبه ی علمی استادیار

امضای مدیر گروه



چکیده:

فریت استرانسیوم با فرمول $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ از فریت های سخت و یکی از پر کاربرد ترین آنهاست که به دلیل داشتن نیروی وادارندگی و پایداری شیمیایی بالا و هزینه ی پائین تولید، به گستردگی در صنایع گوناگون مانند صنعت الکترونیک و محیطهای ضبط مغناطیسی به کار می رود. این فریت با روش های گوناگونی از جمله روش هم رسوبی، روش مکانو شیمیایی، روش سل - ژل، روش متداول سرامیکی و . . . تهیه می شود. مواد اولیه ای که معمولاً در روش متداول سرامیکی برای تولید فریت استرانسیوم به کار می رود، کربنات استرانسیوم (SrCO_3) و هماتیت (Fe_2O_3) و در روش های دیگر نیتراهای آهن و استرانسیوم، هستند. کربنات استرانسیوم معمولاً از کانی سلسنتین (SrSO_4) در فرایندی شامل پخت در دمایی بالاتر از 1000°C تهیه می گردد. برای تولید، دسترسی آسان به مواد اولیه و همچنین بهای پائین از اهمیت فراوانی برخوردار است. یکی از راه های کاهش هزینه ها در تولید فریت استرانسیوم، استفاده ی مستقیم از کانی سلسنتین به جای کربنات استرانسیوم است که یکی از فراوان ترین کانی های استرانسیوم است.

در این پژوهش پودرهای نانومتری فریت استرانسیوم، با کاربرد مستقیم سلسنتین، از روش مکانوشیمیایی تهیه شد. با آسیاب کاری، تلاش بر آن بود که دمای تشکیل فاز و تک فاز شدن فریت استرانسیوم را پائین آورده و در نتیجه به ذراتی ریزتر، نسبت به روش متداول سرامیکی، دست یابیم. فریت استرانسیوم به دست آمده از این روش در دمای 850°C تک فاز شد، که این دما به گونه ی چشمگیری نسبت به دمای برشتن همین فریت در روش متداول پایین تر است. در روش متداول سرامیکی کمترین دمای تشکیل فاز 1150°C است.

با ریزتر کردن ذرات و رساندن به حد بحرانی ابرپارامغناطیس، می توان از این فریت در تهیه محیطهای ضبط عمودی مغناطیسی، که ظرفیت های بالا در حد ترابایت دارند، بهره گرفت. از کاربردهای دیگر می توان به دارورسانی هدفمند اشاره کرد. با آسیاب کاری پر انرژی پودرهای فریت استرانسیوم تهیه شده با سلسنتین به مدت زمان های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۲ ساعت، تلاش شد تا اندازه ی ذرات را به حد ابرپارامغناطیس برسانیم. فازیابی نمونه ها با روش پراش سنجی پرتو ایکس انجام شد و اندازه ی بلورکها از الگوی پراش پرتو ایکس و کاربرد فرمول شرر به دست آمد. پودرهای تک فاز به کمک دستگاه پرس و قالب مناسب به قرص تبدیل شد و منحنی پسماند مغناطیسی آنها با دستگاه پرمیامتر رسم شد. همچنین دمای کوری نمونه ها با دستگاه ترازوی فاراده تعیین شد.

کاهش دمای برشتن، منجر به جلوگیری از رشد بلورکها شده به گونه ای که میانگین اندازه ی بلورک پودر تک فاز شده 36 nm به دست آمد. نتیجه ها نشان داد که با بالا رفتن زمان آسیاب کاری تا ۱۲ ساعت، فریت استرانسیوم به SrO و Fe_2O_3 تجزیه می شود. نیروی وادارندگی در اثر آسیاب کاری نخست کاهش و سپس با افزایش زمان آسیاب کاری، افزایش می یابد. بدین ترتیب به نظر می رسد که آسیاب کاری مکانیکی برای رسیدن به حد ابرپارامغناطیس فریت استرانسیوم روش مناسبی نیست.

فریت استرانسیوم به دو شکل همسانگرد و ناهمسانگرد ساخته می شود که تفاوت آنها در مرحله شکل دهی است. فریت ناهمسانگرد در حضور یک میدان مغناطیسی ثابت در حدود ۱ تسلا شکل دهی می شود که سبب می شود درصد زیادی از محور آسان مغناطش ذرات با میدان کاربستی هم سوگردند. فریت استرانسیوم ناهمسانگرد در راستای برتر القای

باقیمانده و نیروی وادارندگی بالاتری نسبت به همین پارامترها برای نمونه‌ی همسانگرد خود دارند. از این رو کاربردهای فراوانی در موتورهای dc و آهن‌رباهای دائمی برخوردار است. در این پژوهش همچنین پودر تک فاز فریت استرانسیوم تهیه شده با سلسنتین در یک میدان مغناطیسی شکل‌دهی و سپس تفجوشی شد. با توجه به تفاوت در شدت قله‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودری و تفجوشی شده، درصد سوگیری بلورکها در فریت ناهمسانگرد تعیین شد که حدود ۷۳ درصد بود.

واژگان کلیدی: نانوذرات، سلسنتین، فرایند مکانوشیمیایی، فریت استرانسیوم ناهمسانگرد، آسیاب کاری پر انرژی، دمای کوری، ابرپارامغناطیس، نیروی وادارندگی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مروری بر مبانی مغناطیس	
تاریخچه.....	۱
۱-۱ سرچشمه‌ی مغناطیسی شدن مواد.....	۲
۲-۱ رفتار مغناطیسی مواد.....	۳
۱-۲-۱ مواد دیا مغناطیس.....	۳
۲-۲-۱ مواد پارامغناطیس.....	۴
۳-۲-۱ فرومغناطیس‌ها.....	۴
۱-۳-۲-۱ برهم کنش تبادل.....	۵
۴-۲-۱ فری مغناطیس.....	۶
۱-۴-۲-۱ برهم‌کنش ابرتبادل.....	۷
۵-۲-۱ یادفرومغناطیس‌ها.....	۸
۶-۲-۱ ابرپارامغناطیس‌ها.....	۸
۳-۱ ناهمسانگردی مغناطیسی.....	۸
۱-۳-۱ منشأ فیزیکی ناهمسانگردی بلورین.....	۹
۱-۱-۳-۱ ناهمسانگردی مغناطوبلورین تک محور.....	۱۱
۲-۱-۳-۱ ناهمسانگردی مغناطوبلورین مکعبی.....	۱۳
۲-۳-۱ ناهمسانگردی شکل.....	۱۴
۳-۳-۱ ناهمسانگردی مخلوط.....	۱۶
۴-۳-۱ ناهمسانگردی القائی.....	۱۸
۱-۴-۳-۱ تنش.....	۱۸
۲-۴-۳-۱ بازپخت مغناطیسی.....	۲۰
۳-۴-۳-۱ بازپخت تنشی.....	۲۰
۴-۴-۳-۱ تغییر شکل پلاستیک.....	۲۱
۵-۴-۳-۱ تابش‌دهی مغناطیسی.....	۲۱
۴-۱ فریتهای نرم.....	۲۱

عنوان	صفحه
۵-۱ مواد مغناطیسی سخت.....	۲۲
۶-۱ اثر هایپکینسون.....	۲۲
فصل دوم: فن آوری نانو	
..... مقدمه	۲۶
۱-۲ تقسیم بندی نانو مواد.....	۲۷
۲-۲ ویژگی های نانو مواد.....	۲۷
۱-۲-۲ چگونگی تغییر ویژگی های مغناطیسی با اندازه ی ذره.....	۲۹
۱-۱-۲-۲ مغناطش اشباعی ذرات ریز.....	۳۱
۲-۱-۲-۲ نیروی وادارندگی ذرات ریز.....	۳۲
۱-۲-۱-۲-۲ سرچشمه ی حوزه های مغناطیسی.....	۳۳
۲-۲-۱-۲-۲ حوزه در ذرات ریز.....	۳۴
۳-۲-۱-۲-۲ ذره تک حوزه ای.....	۳۴
۴-۲-۱-۲-۲ چرخش همدوس مغناطش در ذرات تک حوزه.....	۳۵
۵-۲-۱-۲-۲ محاسبه قطر ذره تک حوزه.....	۳۶
۶-۲-۱-۲-۲ پدیده ابر پارامغناطیس.....	۳۷
۷-۲-۱-۲-۲ مفهوم پدیده ابر پارامغناطیس براساس زمان واهلش.....	۳۹
۳-۲ روش های تهیه ی ذرات نانومتری.....	۴۰
۱-۳-۲ روش های فازبخار.....	۴۱
۱-۱-۳-۲ روش رسوب گیری فیزیکی از فاز گازی (PVD).....	۴۱
۲-۱-۳-۲ چگالش گاز خنثی.....	۴۱
۳-۱-۳-۲ روش رسوب گیری شیمیایی از فاز گازی CVD.....	۴۱
۴-۱-۳-۲ پاشش شعله ی سوختی.....	۴۲
۵-۱-۳-۲ قوس پلاسما.....	۴۲
۲-۳-۲ روش های تهیه از فاز جامد.....	۴۳
۱-۲-۳-۲ روش متداول سرامیکی.....	۴۳
۲-۲-۳-۲ روش آلیاژ سازی مکانیکی.....	۴۳

صفحه	عنوان
۴۴	۳-۲-۳-۲ روش مکانو شیمیایی.....
۴۴	۱-۳-۲-۳-۲ مواد خام.....
۴۵	۲-۳-۲-۳-۲ آسیاب‌ها.....
۵۰	۳-۳-۲-۳-۲ متغیرهای فرایند.....
۵۳	۴-۳-۲-۳-۲ پخت.....
۵۳	۳-۳-۲ روش‌های تهیه از فاز مایع.....
۵۳	۱-۳-۳-۲ روش هم‌رسوبی شیمیایی.....
۵۴	۲-۳-۳-۲ روش هیدروترمال.....
۵۴	۳-۳-۳-۲ روش نمک‌های مذاب.....
۵۵	۴-۳-۳-۲ روش سل-ژل.....

فصل سوم: بررسی ویژگی‌ها و ساختار بلورین فریت استرانسیوم

۵۶	مقدمه.....
۵۷	۱-۳ فریت‌ها.....
۵۸	۲-۳ سرچشمه‌ی ویژگی مغناطیسی فریت‌ها و نظم فری مغناطیس.....
۶۱	۳-۳ ویژگی‌های فریت استرانسیوم.....
۶۰	۴-۳ ساختار فریت استرانسیوم.....
۶۴	۵-۳ کاربردهای فریت استرانسیوم.....
۶۴	۶-۳ روش تهیه‌ی فریت استرانسیوم.....
۶۵	۱-۶-۳ سلسنتین.....
۷۱	۷-۳ سوگیری بلورک‌ها در فریت استرانسیوم ناهمسانگرد.....

فصل چهارم: شرح دستگاه‌ها، وسایل اندازه‌گیری و روش‌های تجربی

۷۳	مقدمه.....
۷۳	۱-۴ ترازوی دیجیتالی.....
۷۴	۲-۴ آسیاب اسپکس.....
۷۴	۳-۴ کوره‌های الکتریکی.....
۷۵	۴-۴ پرس هیدرولیکی.....

عنوان	صفحه
۴-۵ قالب‌ها.....	۷۶
۴-۶ پرمیامتر.....	۷۶
۴-۷ دستگاه ترازوی فاراده.....	۷۶
۴-۸ دستگاه پراش سنج پرتو ایکس (XRD).....	۷۷
۴-۹ مواد خام.....	۷۷
۴-۱۰ مراحل تهیه نانوپودر فریت استرانسیوم با کاربرد مستقیم سلسنتین به روش مکانوشیمیایی.....	۷۸
۴-۱۱- تعیین درصد سوگیری بلورک‌ها در فریت استرانسیوم ناهمسانگرد.....	۸۰
۴-۱۲- فازبندی نمونه‌ها.....	۸۰
۴-۱۳- تعیین میانگین اندازه‌ی دانه‌ها.....	۸۰
۴-۱۴- اندازه‌گیری B-H.....	۸۰
۴-۱۴-۱- قرص زنی برای اندازه‌گیری B-H.....	۸۱
۴-۱۴-۲- سیم پیچی.....	۸۱
۴-۱۴-۳- رسم چرخه‌ی پسماند.....	۸۱
فصل پنجم: نتایج و تعابیر	
.....مقدمه.....	۸۲
۵-۱- بررسی الگوهای XRD ی نمونه‌ها.....	۸۳
۵-۲- منحنی‌های پسماند نمونه‌ها.....	۸۶
۵-۳- منحنی مغناطش-دما‌ی نمونه‌ها.....	۹۰
۵-۴- تعیین میزان به سوگیری بلورک‌ها در فریت استرانسیوم ناهمسانگرد از الگوهای پراش پرتو ایکس.....	۹۲
.....نتیجه‌گیری.....	۹۵
.....پیشنهادها.....	۹۶
.....مرجع‌ها.....	۹۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: آرایش منظم گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه.....	۴
شکل ۱-۲: تغییرات انتگرال تبادلی، J_{ex} ، بر حسب $\frac{r_a}{r_d}$. (مقادیر مثبت نشان دهنده جفت‌شدگی رومغناطیسی و منفی آن نشان دهنده حالت پادرومغناطیسی است).....	۶
شکل ۱-۳: جفت‌شدگی اسپین-شبهه-مدار.....	۱۰
شکل ۱-۴: منحنی مغناطیدگی مربوط به آهن، نیکل، کبالت در جهت‌های گوناگون.....	۱۱
شکل ۱-۵: منحنی‌های مغناطش برای تک بلور کبالت.....	۱۲
شکل ۱-۶: ساختار حوزه‌های بلورهای تک محوری در حالت وامغناطیدگی.....	۱۲
شکل ۱-۷: سطوح انرژی ناهمسانگردی مرتبه اول برای آهن (a) نیکل (b) کرم (c). طول بردار شعاعی در هر نقطه روی سطح چگالی انرژی ناهمسانگردی را در آن نقطه نشان می‌دهد.....	۱۳
شکل ۱-۸: انرژی مغناطوایستایی یک نمونه مغناطیده در میدان کاربستی صفر.....	۱۴
شکل ۱-۹: نمونه بیضی‌گون کشیده.....	۱۵
شکل ۱-۱۰: ناهمسانگردی‌های عمود بر هم.....	۱۷
شکل ۱-۱۱: اثر تنش کششی (+) و تراکمی (-) کاربردی بر مغناطش نیکل چند حوزه‌ای $10,000 \text{ lb/in} \approx 69 \text{ MPa}$	۱۹
شکل ۱-۱۲: اثر تنش کششی بر مغناطش ماده‌ای با مغناطوتنگش مثبت.....	۲۰
شکل ۱-۱۳: مقایسه‌ی منحنی تغییر مغناطش با دما برای NiFe_2O_4 ، CoFe_2O_4 و $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ در میدان 50 Oe	۲۴
شکل ۱-۱۴: وادارندگی NiFe_2O_4 ، CoFe_2O_4 و $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ به صورت تابعی از دما.....	۲۵
شکل ۱-۱۵: منحنی مغناطوگرمایی برای $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ در میدان‌های کاربستی متفاوت.....	۲۵
شکل ۲-۱: اثر لایه‌ی اسپین - شیشه به ضخامت t بر روی مغناطش اشباعی.....	۳۲
شکل ۲-۲: تغییر نیروی وادارندگی H_c با قطر ذره (D). D_{sp} اندازه‌ی ذره ابرپارامغناطیس و D_s اندازه‌ی ذره تک حوزه هستند.....	۳۳
شکل ۲-۳: سرچشمه‌ی حوزه‌ها.....	۳۴
شکل ۲-۴: حلقه پسماند برای حالت‌هایی که میدان مغناطیسی H عمود یا موازی با محور آسان به کار بسته شود.....	۳۶
شکل ۲-۵: منحنی پسماند مربوط به مواد (الف) ابرپارامغناطیس و (ب) فرومغناطیس.....	۳۸

عنوان

صفحه

- شکل ۲-۶ توضیح مفهوم ابرپارامغناطیس. سه عدد دایره نشان دهنده سه نانو ذره مغناطیسی و بردارهای درون آنها نشان دهنده جهت مغناطش آنها است. (a) در دماهای به اندازه کافی کمتر از دمای T_B ($\tau \gg \tau_m$) گشتاورها دارای حالت نیمه پایدار هستند. (b) در دماهای به اندازه کافی بالای T_B ($\tau \ll \tau_m$) تغییر جهت گشتاورها بسیار سریع صورت می‌گیرد به گونه‌ای که در نبود میدان‌های بیرونی میانگین گشتاورهای مغناطیسی در واحد زمان در هر ذره صفر خواهد بود..... ۴۰
- شکل ۲-۷: آسیاب اسپکس دو مخزنه..... ۴۶
- شکل ۲-۸ آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای..... ۴۷
- شکل ۲-۹: آسیاب سایشی..... ۴۸
- شکل ۲-۱۰: آسیاب‌های تجاری برای کاربرد در فرایند مکانوشیمیایی..... ۴۹
- شکل ۳-۱ تغییرات مغناطش فریت نیکل (یک فری مغناطیس) با دما، در این شکل منحنی مغناطش آهن نسبت به دما (یک فری مغناطیس) نیز برای مقایسه آمده است ۵۷
- شکل ۳-۲ تغییرات وارون پذیرفتاری فریت نیکل ($\text{NiO} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$) با دما (در ناحیه پارامغناطیس)..... ۵۹
- شکل ۳-۳ الف) نحوه چینش اتم‌ها برای ساختار hcp و ساختار fcc ب) نمایش طرح‌وار ساختار فریت استرانسیوم..... ۶۱
- شکل ۳-۴ نمای مقطع یک یاخته‌ی واحد مگنتوپلمیت، محور c در صفحه شکل قرار دارد. کره‌های کوچک کاتیون‌ها و پیکانها گشتاورهای مغناطیسی آنها را نشان می‌دهند..... ۶۳
- شکل ۳-۵ تغییرات مغناطش اشباعی فریت استرانسیوم بر حسب دما..... ۶۴
- شکل ۳-۶ کاربرد ترکیب‌های استرانسیوم در زمینه‌های گوناگون..... ۶۶
- شکل ۳-۷ تولیدات جهانی سلسنتین طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ (مقیاس "تن")..... ۶۷
- شکل ۳-۸ نمودار روند تولید کربنات استرانسیوم از سلسنتین به روش بلک اش..... ۶۸
- شکل ۳-۹ نمودار روند تولید کربنات استرانسیوم از سلسنتین به روش تجزیه مستقیم..... ۶۹
- شکل ۳-۱۰ نمودار روند تولید کربنات استرانسیوم از سلسنتین به روش مکانوشیمیایی..... ۷۰
- شکل ۴-۱ الف) آسیاب اسپکس دو مخزنه؛ ب) مخزن فولادی..... ۷۴
- شکل ۴-۲ الف) کوره‌ی محفظه‌ای ب) کوره‌ی الکتریکی کوچک..... ۷۵
- شکل ۴-۳ پرس هیدرولیکی..... ۷۵
- شکل ۴-۴ قالب‌های فولادی..... ۷۶

عنوان

صفحه

- شکل ۴-۵ طرحی از یک سیستم پراش پرتو ایکس..... ۷۷
- شکل ۵-۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی ۲۰ ساعت آسیاب کاری شده..... ۸۳
- شکل ۵-۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های پخت داده شده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ °C..... ۸۴
- شکل ۵-۳ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی تک فاز پخت داده شده در ۸۵۰ °C پس از شستن..... ۸۵
- شکل ۵-۴ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های آسیاب کاری شده..... ۸۷
- شکل ۵-۵ منحنی پسماند نمونه‌ی تک فاز پخته شده در دمای ۸۵۰ °C..... ۸۷
- شکل ۵-۶ منحنی پسماند نمونه‌ی آسیاب کاری شده به مدت ۳ ساعت..... ۸۸
- شکل ۵-۷ منحنی پسماند نمونه‌ی آسیاب کاری شده به مدت ۵ ساعت..... ۸۸
- شکل ۵-۸ منحنی پسماند نمونه‌ی آسیاب کاری شده به مدت ۷ ساعت..... ۸۹
- شکل ۵-۹ منحنی پسماند نمونه‌ی آسیاب کاری شده به مدت ۱ ساعت..... ۸۹
- شکل ۵-۱۰ منحنی پسماند نمونه‌ی آسیاب کاری شده به مدت ۱۲ ساعت..... ۹۰
- شکل ۵-۱۱ منحنی‌های مغناطش-دما نمونه‌های آسیاب کاری شده و نمونه‌ی پخته شده در ۸۵۰ °C..... ۹۱
- شکل ۵-۱۲ الگوی پراش پرتو ایکس پودر فریت استرانسیوم..... ۹۳
- شکل ۵-۱۳ الگوی پراش پرتو ایکس قطعه‌ی تفجوشی شده‌ی ناهمسانگرد..... ۹۳
- شکل ۵-۱۴ ساختار ریز فریت استرانسیوم، از سطح شکست قطعه و در جهت موازی با میدان مغناطیسی کاربستی به هنگام شکل دهی..... ۹۴
- شکل ۵-۱۵ ساختار ریز فریت استرانسیوم، از سطح شکست قطعه و در جهت عمود بر میدان مغناطیسی کاربستی به هنگام شکل دهی..... ۹۴

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۰.....	جدول ۱-۲ مقایسه‌ی رفتار مغناطیسی فلزات به شکل توده‌ای و نانو ذرات.....
۶۷.....	جدول ۱-۳ ویژگی‌های فیزیکی سلسنتین.....
۷۹.....	جدول ۱-۴ درصد وزنی مواد اولیه.....
۸۶.....	جدول ۱-۵ میانگین اندازه بلورک نمونه‌ی پخته شده در دمای 850°C آسیاب کاری شده در زمان‌های گوناگون.....
۹۰.....	جدول ۲-۵ مقدارهای $4\pi M_s$ و H_c نمونه‌ها.....
۹۲.....	جدول ۳-۵ دمای کوری نمونه‌ها.....

فصل اول

مروری بر

مبانی مغناطیس

تاریخچه

کشف ویژگی‌های مغناطیسی مواد به حدود ۳۰۰۰ سال پیش برمی‌گردد. در آن زمان دانشمندان نتوانستند این پدیده را توصیف کنند، ولی پس از مدت زمان زیادی یعنی در سال ۱۶۰۰ میلادی یک پژوهشگر انگلیسی به نام ویلیام گیلبرت (William- Gilbert) در کتابی به نام نظریه جدید از مغناطیس، توصیف کاملی از این پدیده را ارائه داد. در سال ۱۸۲۰ میلادی اورستد (Orested) فیزیکدان دانمارکی کشف کرد که یک جریان الکتریکی می‌تواند عقربه مغناطیسی را منحرف کند. این پدیده آغاز جدیدی در شناخت نظریه‌های الکترومغناطیسی به شمار می‌آید با تکامل سریع علم فیزیک، دانشمندانی نظیر نیل (Néel) اصول نظریه‌های فیزیکی در رابطه با ویژگی مغناطیسی مواد فری مغناطیس را ارائه دادند، به گونه‌ای که هم اکنون معلوم شده است که اتمهای تشکیل دهنده این مواد در رابطه با ویژگی فیزیکی آنها نقش ارزنده‌ای را ایفا می‌کند. از نظر علمی مواد مغناطیسی می‌تواند در تایید نظریه‌های کوانتومی در آزمایشگاهها مورد بهره برداری قرار گیرند، به گونه‌ای که دانش مغناطیس بی نظریه‌های کوانتومی تفسیر ناشدنی است [۱].

۱-۱ سرچشمه‌ی مغناطیسی شدن مواد

با توجه به اینکه پاسخ مواد مختلف در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی \vec{H} متفاوت است، مواد به پنج گروه دیا، پارا، فرو، آنتی و فری مغناطیسی تقسیم بندی می‌شوند. به طور کلی سه عامل در سرچشمه‌ی مغناطیسی شدن مواد سهیم است:

الف) گشتاور اسپینی الکترون‌ها

ب) گشتاور مداری الکترون‌ها

ج) گشتاور القایی ناشی از میدان مغناطیسی بیرونی

که دو مورد نخست در خاصیت پارا، فرو، آنتی فرو و فری مغناطیس و مورد سوم در خاصیت دیا مغناطیس مواد نقش دارد [۲].

هرگاه ماده‌ای در معرض یک میدان خارجی \vec{H} قرار گیرد، بر هم کنش بین الکترون‌های یک اتم و میدان خارجی باعث القای یک گشتاور مغناطیسی می‌شود، این پدیده را دیا مغناطیس می‌گویند، و با توجه به اینکه همه مواد دارای الکترون هستند این پدیده در تمام مواد رخ می‌دهد، اما این ساختار الکترونی اتم است که در وجود یا عدم وجود گشتاور مغناطیسی دائم نقش ایفا می‌کند. اگر بر هم کنش یا جفت شدگی بین گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های ماده در حضور میدان خارجی \vec{H} خیلی کوچک باشد، ماده را پارا مغناطیس می‌گویند، که در این حالت برآیند گشتاور مغناطیسی این مواد در غیاب میدان خارجی \vec{H} صفر است. اما اگر جفت شدگی بین گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های مختلف خیلی بزرگ باشد سه حالت مهم می‌تواند رخ دهد:

حالت اول: حالتی که گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های مختلف در یک حوزه با یکدیگر موازی باشند که

در این حالت جسم را فرو مغناطیس می‌گویند، که این مواد در هر حوزه و در غیاب میدان خارجی \vec{H} دارای یک گشتاور مغناطیسی دائم هستند.

حالت دوم: قبل از توضیح لازم است بدانیم که گشتاورهای مغناطیسی می‌توانند درون شبکه‌هایی شامل زیر

شبکه‌های A و B قرار بگیرند، بطوریکه جهت گشتاور مغناطیسی زیر شبکه A "پاد موازی" با زیر شبکه B است.

اکنون اگر اندازه گشتاورهای مغناطیسی زیر شبکه‌های A و B در یک حوزه یکسان باشد جسم را پاد

فرومغناطیس گویند. واضح است که در حالت پاد فرومغناطیسی برآیند گشتاور مغناطیسی درون هر حوزه صفر

است.

حالت سوم: اگر اندازه گشتاورهای مغناطیسی در زیر شبکه‌های A و B برابر نباشند جسم را فری مغناطیس گویند. در حالت فری مغناطیس برآیند گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه مخالف صفر است.

۲-۱ رفتار مغناطیسی مواد

ساده‌ترین روش برای متمایز کردن رفتار مغناطیسی مواد آن است که آنها را بر حسب یک کمیت قابل اندازه‌گیری شرح دهیم. مواد از لحاظ رفتار مغناطیسی متفاوتند، مهمترین رفتارها عبارتند از دیا مغناطیس، فرومغناطیس، فری مغناطیس، پادفرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس. کمیت‌های مورد نظر عبارتند از c پذیرفتاری و m تراوانی ماده مغناطیسی:

$$m = \frac{\mu B}{H} \quad m = \frac{dB}{dH} \quad (1-1)$$

$$c = \frac{\mu M}{H} \quad c = \frac{dM}{dH} \quad (2-1)$$

۱-۲-۱ مواد دیا مغناطیس

بروز خاصیت دیامغناطیسی در برخی عناصر به این دلیل است که فاقد گشتاور مغناطیسی اتمی دائمی هستند. این اتم‌ها دارای پوسته‌های الکترونی پر هستند و در نتیجه هیچ گشتاور مغناطیسی خالصی ندارند و هنگامی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند مغناطش القا شده در آنها براساس قانون لنز با میدان اعمالی مخالفت می‌کند و در نتیجه پذیرفتاری منفی دارند.

پذیرفتاری براساس نظریه کلاسیکی دیامغناطیس لانژوین با رابطه

$$c = \frac{-mze^2 n d^2}{6m_e} \quad (3-1)$$

بیان می‌شود. در این رابطه n تعداد اتم‌ها در واحد حجم، Z تعداد الکترون‌های هر اتم، e بار الکتریکی، m_e جرم الکترون و Γ^2 متوسط مربع شعاع اتمی است که حدوداً از مرتبه $10^{-21} m^2$ است. پذیرفتاری دیامغناطیسی مستقل از دماست [۳].

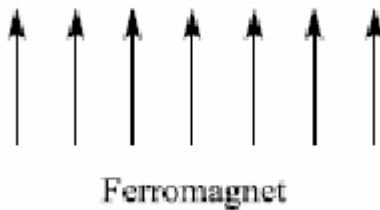
این مواد دارای پذیرفتاری کوچک و منفی از مرتبه 10^{-6} هستند، و میدان مغناطیسی اعمال شده را دفع می‌کنند. مس، نقره، طلا، بیسموت و برلیوم مثال‌هایی از مواد دیامغناطیس هستند.

۲-۲-۱ مواد پارامغناطیس

رفتار پارامغناطیسی در موادی که گشتاور مغناطیسی خالص غیر صفر دارند ظاهر می‌شود در این حالت گشتاورهای مغناطیسی به طور ضعیفی به هم جفت شده‌اند. با اعمال میدان مغناطیس خارجی، کسر کوچکی از گشتاورها در امتداد میدان قرار می‌گیرند. پذیرفتاری این مواد کوچک، ولی مثبت است و در محدود $10^{-3} < \chi < 10^{-6}$ قرار دارد. مغناطش این مواد ضعیف است ولی هر گاه دمای ماده به اندازه کافی پائین آورده شود و از میدانهای مغناطیسی قوی استفاده گردد، چنانکه عبارت H/T به سمت بی نهایت میل کند، می‌توان ماده را به اشباع مغناطش رساند و مغناطش ذرات تشکیل دهنده آن را با میدان خارجی هم جهت کرد. آلومینیوم، پلاتین و منگنز پارامغناطیس هستند [۴].

۳-۲-۱ فرومغناطیس‌ها

حتی در غیاب میدان مغناطیسی، مواد مغناطیسی از حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند که در هر حوزه گشتاورهای مغناطیسی نظم مشخصی دارند که در بالای دمای کوری این نظم از بین می‌رود. نظم مغناطیسی فرو در هر حوزه در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱: آرایش منظم گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه.

هرگاه در یک ماده پارامغناطیسی با تراکم N یون با اسپین S یک برهم‌کنش داخلی باعث ردیف شدن گشتاورهای مغناطیسی شود، یک فرومغناطیسی خواهیم داشت. وایس تئوری وجود میدان مولکولی را برای تعریف این برهم‌کنش پیشنهاد کرد.

$$B = 1 M$$

(۴-۱)

در این رابطه λ ثابت مستقل از دما و M مغناطش است. در این تقریب هر اتم مغناطیسی تحت تاثیر میدان B قرار می‌گیرد. نظریه‌ی میدان مولکولی وایس شروع رفتار فرومغناطیسی در زیر دمای کوری و بروز رفتار پارامغناطیسی در بالای دمای کوری (قانون کوری-وایس) را با موفقیت پیش بینی می‌کند [۳]. اما اندازه این میدان به طور غیر منطقی بزرگ است و نمی‌تواند دلیل برهم کنش میان گشتاورهای مغناطیسی باشد، زیرا این برهم کنش در یک تعادل گرمایی قادر به ایجاد چنین نظمی نیست.

۱-۲-۳-۱ بر هم کنش تبدالی

در سال ۱۹۲۸ هاینبرگ نشان داد که سرچشمه واقعی میدان مولکولی وایس بر هم کنش تبدالی بین اسپین الکترون‌های مجاور است. کوانتوم مکانیک پیش بینی می‌کند که در بر هم کنش تبدالی بین دو اتم متقارن، اصل طرد پائولی و بر هم کنش کولنی نقش دارند. اصل طرد پائولی احتمال هم‌پوشانی دو تابع موج الکترونی را در صورت پادموازی بودن اسپین‌ها تقویت می‌کند ولی اگر اسپین‌ها هم‌جهت باشند مایل است آنها را از هم دور نگه دارد. بر اساس طرد پائولی فقط دو الکترون با اسپین‌های پادموازی در یک اتم مجاز هستند اربیتال مولکولی یا اتمی یکسانی را اشغال کنند که در این حالت به دلیل هم‌پوشانی توابع موج، دافعه کولنی الکتروستاتیکی افزایش می‌یابد. در مقابل اسپین‌های موازی باید اربیتال‌های اتمی متفاوت را اشغال کنند و در نتیجه دافعه کولنی نامطلوب کمتری خواهند داشت پس پیکربندی موازی و پادموازی انرژی‌های متفاوتی دارند. هاینبرگ نشان داد که این اثرات منجر به یک انرژی تبدالی می‌شود که بصورت:

$$E_{ex} = - 2J_{ex} S_i \cdot S_j \quad (5-1)$$

تعریف می‌شود که در آن S_i و S_j اسپین‌های دو اتم مجاور و J_{ex} انتگرال تبادل می‌باشد. حالتی که $J_{ex} > 0$ باشد، اسپین موازی و جفت شدگی فرومغناطیس و حالتی که $J_{ex} < 0$ باشد مربوط به پیکربندی

پادموازی و جفت شدگی پادفرومغناطیس است. اسلیتر به صورت تجربی دریافت که ارتباطی بین نسبت $\frac{r_a}{r_d}$

مربوط به عناصر فلزات واسطه و علامت انتگرال تبدالی وجود دارد. r_a فاصله بین اتمی و r_d شعاع پوسته‌ی

کامل نشده $3d$ است [۵]. مطابق شکل (۱-۲) اگر $\frac{r_a}{r_d} < 1.5$ باشد انتگرال تبدالی منفی است و بالاتر از این مقدار،

مثبت می‌شود و در $\frac{r_a}{r_d} < 1.8$ بیشترین مقدار خود می‌رسد.