



دانشگاه یزد
دانشکده فیزیک
گروه فیزیک حالت جامد

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
فیزیک حالت جامد

سنتز نانوساختار $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ، لایه نشانی نانوذرات تولید شده و
مطالعه خواص مغناطیسی آنها

اساتید راهنما:
دکتر حسین مختاری
دکتر محمد حسن یوسفی

اساتید مشاور:
دکتر قاسم انصاری پور
سهراب منوچهری

پژوهش و نگارش: سجاد روانخواه

مهر ماه ۱۳۸۸

تقدیم به یگانہ های زندگی ام

پدرم، که سرفراز زیستن را به من آموخت
مادرم، الهه مهربانی که وجودم لبریز از محبت های اوست
به پاس تمام دلواپسی ها، امیدها و آرزوهای بی پایان آن ها برای من

و

همسرم

که آهنگ عشق و مهربانی را همواره در گوشم زمزمه میکند
که اگر نبود پی میودن این راه میسر نبود.

به نام خالق بی همتا

اکنون که برک دیگری از صفحه زندگی ورق خورده و مرحله دیگری از کسب علم و معرفت را پشت سر گذاشتم، خدا را شاکرم و سپاس می گویم که مرا لایق آموختن گردانید. چرا که بی لطف و عنایت آن یگازی بی همتا این مهم فراموش نمی شد.

بهرمانی که مراد طی این راه پرشقت یاری کرده اند بسیار و ابزاری جز قدردانی و سپاس در دست نیست تا گوشه ای از محبت های آن ها را جبران کنم.

از دو کوهر کرانیه زندگی ام، پدر و مادر عزیزم که اسوه ایثار و عشق اند، پاسکزارم و هزاران باردستان پر مهرشان را می بوسم. همچنین از برادران و خواهران عزیزم که پشتیبانی های بی دریغشان همواره مایه ای دلگرمی هایم بوده، تشکر می کنم.

از معلم زندگی ام، جناب آقای دکتر فرامرز کجوری به پاس همه ی راهنمایی ها و دلگرمی های بی نیت پاسکزارم. از استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسین مختاری که حیات های بی دریغشان گره گشای کارهایم بود کمال تشکر و قدردانی را دارم و برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت را دارم. همچنین از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد حسن یوسفی که در انجام مراحل مختلف تحقیق مساعدت های بی شماری را مبنی بر فرمودند و به حق جز با کمال ایشان این تحقیق به ثمر می رسد، کمال تشکر را دارم و افتخار شاکردی ایشان، فرصتی ارزشمند برای من بوده است.

از داور خارجی پایان نامه جناب آقای دکتر علی اعظم خسروی و داور داخلی جناب آقای دکتر غضنفر میرجلیلی و داور تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر طالبی و آقای دکتر قاسم انصاری پور در سمت اساتید مشاور پاسکزارم. از آقایان سهراب منوچهری و غلامرضا امیری که با صبر و حوصله پاسخگوی مسائل بودند و در کارهای آزمایشگاهی راهنمایی بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در طول مدت تحصیل و انجام پایان نامه دوستان بسیاری مشوق و همراهم بودند که مجال ذکر نام تک تک آن ها فراموش نیست. لذا از تمامی آن ها پاسکزارم و توفیق روزافزونشان را از درگاه خداوند خواستارم.


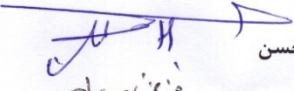
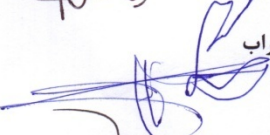
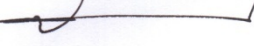

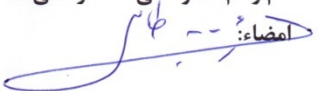
آخرین کلام من با توست بمسرم، ای مهربان همراه

من با توام، تو با من هر جا که آسمان هست،

هر جا که مهربانی یک ذره ای نشان هست.

به خاطر همه ی فداکاریت پاسکزارم و صبر زیبای تو را می تایم.

بسمه تعالی

شناسه: ب/ک/۳	صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد	 مدیریت تحصیلات تکمیلی
<p>جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای / خانم: سجاد روانخواه دانشجوی کارشناسی ارشد رشته / گرایش: فیزیک حالت جامد تحت عنوان: سنتز نانوساختار $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ لایه نشانی نانو ذرات تولید شده و مطالعه خواص مغناطیسی آنها و تعداد واحد: ۶ در تاریخ ۸۸/۷/۲۸ با حضور اعضای هیأت داوران (به شرح ذیل) تشکیل گردید. پس از ارزیابی توسط هیأت داوران، پایان نامه با نمره: به عدد ۱۹/۴۲ به حروف: نوزده و چهل و دو صدم و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.</p>		
<u>امضاء</u>	<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>عنوان</u>
	دکتر حسین مختاری - دکتر محمد حسن یوسفی	استاد / استادان راهنما:
	دکتر قاسم انصاری پور - دکتر سهراب منوچهری	استاد / استادان مشاور:
	دکتر غزنفر میرجلیلی	متخصص و صاحب نظر داخلی:
	دکتر علی اعظم خسروی	متخصص و صاحب نظر خارجی:
نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)		
نام و نام خانوادگی: دکتر علی طالبی		
امضاء: 		

چکیده

فریت کبالت-روی، یکی از فریت‌های نرم است که در ابزارهای الکترونیکی نظیر هسته‌های مبدل‌ها، موتورها و مولدهای الکتریکی استفاده شده است.

نانوذرات مغناطیسی توجه محققان و دانشمندان رشته‌های مختلف را به علت کاربردهای وسیع در سیستم ذخیره اطلاعات، تشخیص‌های پزشکی، فناوری فروسپال و غیره به خود جلب کرده است که این اساساً به دلیل متفاوت بودن نانوذرات از نمونه‌ی کپه‌ای متناظر است. نانوذرات فریت $\text{Co}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ با پارامتر استوکیومتری x که از ۰/۰ تا ۱/۰ تغییر می‌کند، به روش هم‌رسوبی تهیه شده‌اند. نمونه‌های پودر به روش‌های XRD، TEM و AGFM مشخصه‌یابی شده‌اند. در ادامه، فیلم‌های نازک فریت از نانوذرات $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ به روش کندوپاش با امواج رادیویی بر روی زیر لایه‌ی شیشه و آلومینا رسوب داده شد. فیلم‌های نازک فریت به علت خواص مغناطیسی و الکتریکی متفاوت، پایداری شیمیایی بالا و سختی مکانیکی برای کاربردهای عملی مانند محیط ضبط مغناطیسی، سنسورهای مغناطیسی و کاربردهای ریز موج مورد توجه هستند. خواص ساختاری و مغناطیسی فیلم‌های رسوب داده شده با استفاده از XRD و AGFM مورد بررسی قرار گرفت.

فهرست

صفحه

عنوان

فصل اول: مروری بر نظریه مغناطیس و فریت‌ها

- ۱-۱- نظریه‌ی مغناطیس ۳
- ۱-۱-۱- نظریه مغناطیس بوهر و گشتاورهای اسپینی ۳
- ۲-۱-۱- میدان مولکولی وایس و برهم‌کنش تبادل و ابرتبادل ۴
- ۳-۱-۱- دسته بندی مواد از نظر خواص مغناطیسی ۷
- ۴-۱-۱- تأثیر دما بر رفتار مغناطیسی ۱۲
- ۵-۱-۱- حوزه‌ها(تک حوزه‌ها- دیواره حوزه) ۱۳
- ۶-۱-۱- ناهمسانگردی‌های مغناطیسی ۱۶
- ۲-۱- مکان‌های بین نشینی در شبکه مکعبی مرکز سطحی (FCC) ۱۷
- ۳-۱- مبانی نظری خواص مغناطیسی فریت‌ها ۱۹
- ۱-۳-۱- مشخصات کلی سرامیک‌ها ۱۹
- ۲-۳-۱- انواع فریت‌های اسپینلی ۲۰
- ۳-۳-۱- ساختمان فریت‌های اسپینلی ۲۲
- ۱-۳-۳-۱- برهم‌کنش بین گشتاورهای مغناطیسی در جایگاه‌های شبکه ۲۳
- ۲-۳-۳-۱- جاننشینی یون‌ها در ساختمان اسپینلی ۲۷
- ۴-۳-۱- خواص فیزیکی فریت‌ها ۲۹
- ۵-۳-۱- خواص مغناطیسی فریت‌ها ۳۱

فصل دوم: سنتز نانوذرات

- ۱-۲- نانو تکنولوژی ۳۳
- ۲-۲- طبقه بندی تولید نانوذرات ۳۵
- ۱-۲-۲- بر مبنای روش تولید ۳۵
- ۲-۲-۲- بر مبنای ماهیت فرایند ۳۶
- ۳-۲-۲- بر مبنای انرژی ۳۷
- ۴-۲-۲- بر مبنای محیط تشکیل نانوذرات ۳۷
- ۳-۲- روش‌های تولید پودرهای نانومقیاس ۳۸

۳۸	۱-۳-۲- روش‌های مکانیکی (فیزیکی)
۳۹	۲-۳-۲- روش‌های شیمیایی
۳۹	۱-۲-۳-۲- روش‌های واکنش جامد- جامد
۴۰	۲-۲-۳-۲- رسوب گذاری و هم‌رسوبی
۴۰	۳-۲-۳-۲- سل- ژل
۴۱	۴-۲-۳-۲- فرایند امولسیون
۴۲	۳-۳-۲- تکنیک‌های رسوب از فاز گازی
۴۳	۴-۲- کاربرد نانوذرات
۴۵	۵-۲- کاربردهای نانوذرات مغناطیسی
۴۶	۶-۲- کنترل کیفی بر نانوذرات

فصل سوم: لایه‌های نازک

۴۸	۱-۳- انواع لایه‌های نازک
۵۰	۱-۱-۳- شکل‌گیری لایه‌های نازک
۵۱	۲-۳- مراحل مختلف رشد
۵۴	۱-۲-۳- انواع رشد بلور
۵۶	۳-۳- روش‌های ساخت لایه نازک
۵۶	۱-۳-۳- روش‌های انباشت فیزیکی بخار (PVD)
۶۳	۴-۳- کاربردهای لایه نازک
۶۳	۱-۴-۳- کاربردهای خواص مکانیکی
۶۴	۲-۴-۳- کاربردهای الکترونیکی و میکروالکترونیک
۶۴	۳-۴-۳- صنایع اپتیک
۶۵	۴-۴-۳- صنایع متالوژی و تریبولوژی

فصل چهارم: فعالیت‌های آزمایشگاهی

۷۰	۱-۴- سنتز نانوذرات فریت کبالت جانشرانی شده با روی
۷۱	۲-۴- سنتز نانوذرات فریت
۷۳	۳-۴- مطالعه‌ی نانوذرات فریت کبالت جانشرانی شده با روی
۷۴	۱-۳-۴- بررسی اولیه تشکیل فاز محصول واکنش
۷۴	۲-۳-۴- طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس
۷۶	۳-۳-۴- ریخت‌شناسی نمونه‌ها
۷۸	۴-۳-۴- خصوصیات مغناطیسی نمونه‌ها
۸۳	۵-۳-۴- اثر دما بر رفتار مغناطیسی نمونه‌ها
۸۵	۴-۴- لایه‌نشانی نانوذرات
۸۵	۱-۴-۴- لایه‌های فریت کبالت- روی

- ۸۶..... ۴-۴-۱-۱- انباشت فیزیکی بخار (PVD).....
- ۸۶..... ۴-۴-۱-۲- انباشت به کمک باریکه الکترونی (EB).....
- ۸۷..... ۴-۴-۱-۳- لایه نشانی با کندوپاش RF.....
- ۹۰..... ۴-۴-۲- روش تهیه قرص برای دستگاه لایه نشانی.....
- ۹۳..... ۴-۴-۳- ساختار سنجی فریت کبالت- روی با XRD.....
- ۹۵..... ۴-۴-۴- خصوصیات مغناطیسی لایه‌ها با استفاده از AGFM.....

فصل پنجم: بحث در نتایج

- ۹۹..... ۵-۱- بررسی الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های پودری.....
- ۱۰۲..... ۵-۲- بررسی خصوصیات مغناطیسی نمونه‌های پودری.....
- ۱۰۶..... ۵-۳- بررسی اثر دما بر رفتار مغناطیسی نمونه‌های پودری.....
- ۱۰۷..... ۵-۴- بررسی الگوهای پراش نمونه‌های لایه نشانی شده.....
- ۱۰۹..... ۵-۵- بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌های لایه نشانی شده.....
- ۱۱۱..... ۵-۶- نتیجه گیری.....
- ۱۱۲..... ۵-۷- راهکارهای پیشنهادی.....

مراجع

انبار چیزی قبل از آن که محکم و حتی شود باعث تباہی آن کار است. امام محمد تقی (ع)

فصل اول

مروری بر نظریه‌ی معناطیس و فریت‌ها

داستان مغناطیس با یک کانی که مگنتیت^۱ نامیده شد (نخستین ماده مغناطیسی شناخته شده‌ی بشر) شروع شد. تاریخچه مغناطیس مبهم است، اما قدرت آن در جذب آهن به طور مشخص برای قرن‌های قبل از میلاد مسیح شناخته شده بود. یونانیان باستان می‌دانستند وقتی یک تکه آهن را به مگنتیت مالش دهند، خودش مغناطیسی (آهنربا) می‌شود. بعدها در یک تاریخ نامعلوم، بشر دریافت که می‌تواند از مگنتیت برای دریانوردی استفاده کند و قطب‌نمای ملوانان ساخته شد. به این سنگ معدن لودستون^۲ نیز گفته شده است [۱].

امروزه بسیاری از ابزارهای تکنولوژیکی ما بر خواص مغناطیسی و مواد مغناطیسی تکیه دارند، که از جمله آن‌ها می‌توان به مولدهای قدرت، مبدل‌ها، موتورهای الکتریکی، رادیو، تلویزیون، تلفن‌ها، رایانه‌ها و مؤلفه‌های سیستم‌های تکثیر صدا و تصویر اشاره داشت. آهن، بعضی از فولادها و به طور طبیعی یافت شدن سنگ معدن آهنربا، مثال‌های مشهوری از مواد هستند که خواص مغناطیسی را نشان می‌دهند [۲].

سؤالی که در این جا مطرح می‌شود این است که چرا ما خواص مغناطیسی مواد را بررسی می‌کنیم؟

آگاهی از فرآیندی که رفتار مغناطیسی دائمی مواد را توصیف می‌کند، موجب دگرگونی و مناسب کردن خواص مغناطیسی برای کاربردی نمودن آن‌ها می‌شود [۲]. مطالعات و بحث‌های نظری بسیاری وجود دارد که به بررسی این رفتارها می‌پردازد، که در اینجا به اختصار به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

^۱ Magnetite(Fe₃O₄)

^۲ Lodestone

۱-۱- نظریه مغناطیس

در سال ۱۸۴۵ فارادی^۱ کشف کرد که همه مواد به اندازه‌ی معینی مغناطیسی هستند. فیزیکدان فرانسوی پیر کوری^۲ در سال ۱۸۹۵ خاصیت دیامغناطیس و پارامغناطیس را در شمار زیادی از مواد اندازه‌گیری کرد و نشان داد که چگونه در یک ماده این خواص با دما تغییر می‌کنند [۳].

آندره آمپر^۳ وجود جریان‌های مولکولی کوچک را که هر اتم یا مولکول را یک آهنربای دائمی منفرد می‌سازد، پیشنهاد کرد [۴]. این آهنرباهای اتمی در همه‌ی جهت‌ها به صورت کاتوره‌ای توزیع شده‌اند. اما وقتی یک میدان مغناطیسی به آن‌ها اعمال گردد، در یک راستا سو یافته می‌شوند.

تحقیق برای منشأ این جریان‌های مغناطیسی با کشف الکترون توسط جی جی تامسون^۴ و گزارش در سال ۱۹۰۳ پایان یافت. در سال ۱۹۰۵ دانشمندان دریافتند که جریان‌های مولکولی به علت الکترون‌های سیار^۵ در مولکول‌ها یا اتم‌ها عهده‌دار ویژگی مغناطیسی در مواد هستند [۳].

۱-۱-۱- نظریه مغناطیس بوهر و گشتاورهای اسپینی

نظریه کوانتومی ماده (نیلز بوهر^۶-۱۹۱۳) فرض می‌کند که چرخش الکترون به دور هسته منشأ رفتار مغناطیسی ماده است [۳و۲]. یکای بنیادی مغناطیسی الکترون که نتیجه حرکت مداری یک الکترون در پایین‌ترین مدار است، مگنتون بوهر^۷ نامیده شده است که در سیستم SI برابر $\mu_B = 9/27 \times 10^{-24} Am^2$ و در سیستم CGS برابر $\mu_B = 9/27 \times 10^{-21} erg/O_e$ است.

^۱ Farady

^۲ P. Corie

^۳ Andre Amper(1775-1836)

^۴ J. J. Thompson

^۵ Itinerant Electrons

^۶ Niels Bohr(1885-1962)

^۷ Bohr Magneton

به هر حال، نظریه بوهر (۱۹۱۳) و نظریه سامرفلد^۱ (۱۹۱۶) یک توصیف کامل از منشأ مغناطیسی مواد را فراهم نمی‌کنند. در سال‌های ۱۹۲۵ و ۱۹۲۶ به ترتیب گوداسمیت^۲ و آهلنبک^۳ آهلنبک^۳ مفهوم اسپین الکترون را معرفی کردند که دیگر منشأ مغناطیسی مواد را توضیح می‌دهد [۳]. اسپین الکترون دو حالت را ممکن است اتخاذ کند که عموماً به صورت بردار در جهت بالا و پایین نمایش داده می‌شود. در یک اتم، اسپین‌های جفت شده به طور مخالف متقابلاً یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه گشتاور مغناطیسی ندارند، در حالی که اسپین‌های جفت نشده باعث گشتاور مغناطیسی خالص می‌شوند.

گشتاور مغناطیسی خالص، جمع برداری گشتاورهای مداری و اسپینی الکترون‌های منفرد در خارجی‌ترین پوسته‌ها است [۳ و ۲].

۱-۱-۲- میدان مولکولی وایس^۴ و برهم‌کنش تبادل و ابرتبادل

برهم‌کنش‌های قوی که منجر به نظم گشتاورهای دو قطبی مغناطیسی در مواد مغناطیسی می‌شوند را می‌توان هم‌ارز یک میدان مغناطیسی درونی H_m در نظر گرفت. انرژی گرمایی با نظم ناشی از این میدان مخالفت می‌کند و سرانجام در دمای کوری^۵ این انرژی مغناطش خود به خودی خودی را به طور کامل به هم می‌زند. بدین ترتیب می‌توان H_m را تخمین زد. برای اتم‌هایی با گشتاور دو قطبی مغناطیسی به اندازه یک مگنتون بوهر داریم:

$$\mu_B H_m \cong k_B T_C \quad (1-1)$$

^۱ Sommerfeld

^۲ Goudsmit

^۳ Uhlenbeck

^۴ Weiss molecular field

^۵ Curie temperature

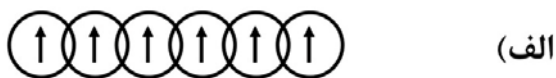
که در آن دمای کوری و k_B ثابت بولتزمن است. اگر دمای کوری از مرتبه 10^3 کلوین (نزدیک به دمای کوری آهن) در نظر بگیریم، $H_m \cong 10^7 O_e$ به دست می‌آید. در نتیجه این میدان خیلی بزرگتر از آن است که بتوان در آزمایشگاه‌ها آن را تولید کرد. اگر چه وایس نمی‌توانست سرچشمه میدان مغناطیسی درونی H_m را توضیح دهد، اما او با فرض اینکه H_m متناسب با مغناطش M است، یک نظریه پدیده شناختی را برای فرومغناطیس-ها گسترش داد:

$$\vec{H}_m = N_w \vec{M} \quad (2-1)$$

که در این رابطه N_w ثابت میدان مولکولی نامیده می‌شود و از مرتبه 10^4 است. به H_m میدان مولکولی، میدان وایس یا میدان تبادل گفته می‌شود [۶و۵]. سرچشمه میدان مولکولی وایس تا پیش از پدید آمدن مکانیک کوانتومی ناشناخته بود. هایزنبرگ نشان داد که این میدان نتیجه برهم‌کنش تبدالی در مکانیک کوانتومی است. این برهم‌کنش همانند کلاسیکی ندارد [۵و۱]. میدان مولکولی در پادفرومغناطیس‌ها نیز سرچشمه‌ی همانندی مانند فرومغناطیس‌ها دارند، که همان برهم‌کنش تبدالی کوانتوم مکانیکی است. با به کارگیری نظریه‌ی هایزنبرگ، هامیلتونی تبادل با معادله‌ی زیر داده می‌شود:

$$H = -2J_e \sum_j \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (3-1)$$

به جز اینکه در اینجا $J_e < 0$ است. در این دستگاه‌ها برهم‌کنش تبدالی به کمک یک یون نامغناطیسی صورت می‌گیرد که به اصطلاح به آن برهم‌کنش ابرتبدالی گفته می‌شود (شکل ۱-۱) [۶و۵].

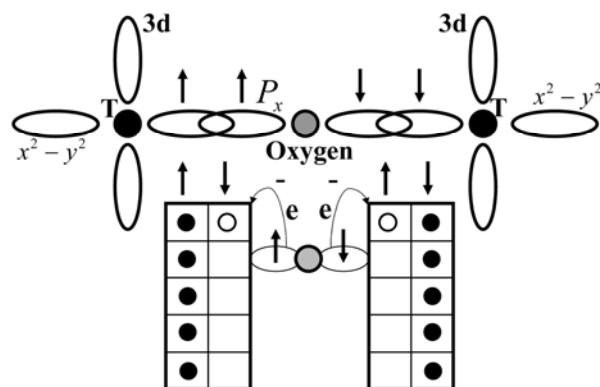


شکل ۱-۱: الف) طرح واره‌ی برهم‌کنش تبادل، ب) برهم‌کنش ابرتبادل که به کمک یون نامغناطیسی انجام می‌گیرد [۶].

دو یون فلز واسطه (T) در شکل ۱-۲ با یک یون P (که در اینجا اکسیژن است) از یکدیگر جدا شده‌اند. اوربیتال P که در حالت زمینه پر شده است، می‌تواند با هر یک از اوربیتال-های $3d$ همسایه خود یک الکترون تبادل نماید. این نوع پیوند بیشتر یک پیوند یونی است، اما تعدادی جهش الکترونی مجاز نیز وجود دارد.

اوربیتال P_x دارای دو الکترون با اسپین مخالف است. در این پیوند به دلیل روی هم قرار گرفتن اوربیتال‌های فلز واسطه و اکسیژن امکان برانگیخته شدن الکترون‌های اکسیژن به تراز d یون فلز واسطه وجود دارد و برهم‌کنش تبدالی تمایل دارد که اسپین الکترون را در جهتی قرار دهد که یون فلزی بیشترین گشتاور دو قطبی اسپینی را داشته باشد (قانون هوند). به همین دلیل و اینکه الکترون‌های اوربیتال P باید اسپین‌های مخالف هم داشته باشند، باید دو یون فلز واسطه با اسپین‌های پادموازی هنگام ایجاد پیوندکنار یکدیگر قرار گیرند (شکل ۱-۲).

برهم‌کنش ابرتبدالی بیشتر در اکسیدهای فلزی‌های واسطه و همچنین در ساختارهای اسپینلی و گارنتی وجود دارند. در برهم‌کنش ابرتبدالی هر چه زاویه $T-O-T$ بزرگ‌تر باشد، هم‌پوشانی بیشتر و برهم‌کنش قوی‌تر است [۳].



شکل ۱-۲: طرح واره‌ی سازوکار برهم‌کنش ابر تبادلی در پیوند دو یون فلز واسطه و اکسیژن [۳].

۱-۳- دسته بندی مواد از نظر خواص مغناطیسی

خواص مغناطیسی مواد به آرایش الکترونی اتم‌ها یا یون‌های موجود در مواد وابسته است. گشتاور مغناطیسی هسته اتم‌ها به طور تقریبی کمتر از یک هزارم گشتاور مغناطیسی مربوط به لایه‌های الکترونی اتم می‌باشد و برای مباحث فعلی می‌توان از آن صرف نظر نمود. لذا گشتاور مغناطیسی جسم را کاملاً ناشی از الکترون‌ها فرض می‌کنیم. گشتاور مغناطیسی الکترون‌ها به دلیل اندازه حرکت‌های زاویه‌ای مداری و اسپینی می‌باشد.

گشتاور مغناطیسی مداری الکترون‌ها در بسیاری از مغناطیس‌های سرامیکی با تقریب خوب صفر است، لذا از آن صرف نظر می‌کنیم. بعداً به طور مختصر علت صفر شدن گشتاور مغناطیسی مداری الکترون‌ها را بیان می‌کنیم. تأثیرپذیری مغناطیسی^۱ χ_m برای مواد مختلف به صورت نسبت مغناطش^۲ M به شدت میدان مغناطیسی H تعریف می‌شود.

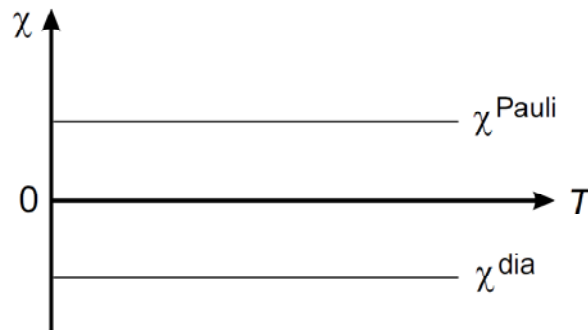
مغناطش عبارت از اندازه گشتاور مغناطیسی کل در واحد حجم جسم می‌باشد. بر حسب مقادیر مختلف χ_m و نظم اتم‌ها یا یون‌های مغناطیسی، می‌توان مواد مختلف را به پنج گروه مختلف تقسیم نمود [۸]:

^۱ Magnetic susceptibility

^۲ Magnetization

أ. مواد دیامغناطیس^۱

در مواد دیامغناطیس χ_m منفی و اندازه آن از مرتبه 10^{-5} می باشد. در موارد مزبور تقریباً مستقل از دما و شدت میدان اعمال شده به جسم است (شکل ۱-۳). علت منفی بودن χ_m در مواد دیامغناطیس آن است که در این مواد تغییرات گشتاور مغناطیسی در حضور میدان خارجی فقط ناشی از قانون لنز می باشد.



شکل ۱-۳: منحنی وابستگی دمایی پذیرفتاری مغناطیسی دیامغناطیس و پارامغناطیس پائولی [۱]

ب. مواد پارامغناطیس^۲

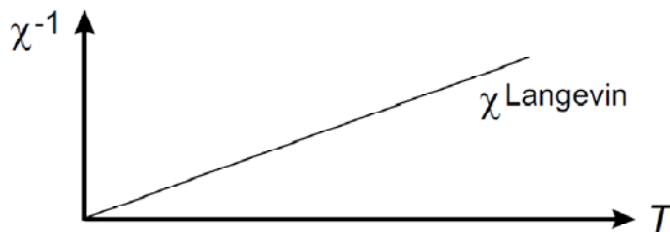
در این مواد χ_m دارای مقدار مثبت است. مقدار χ_m برای مواد پارامغناطیس در دمای اتاق بین 10^{-4} تا 10^{-2} می باشد. در مواد پارامغناطیس، χ_m تابع درجه حرارت است. در دماهای معمولی χ_m وابستگی اندکی به شدت میدان اعمال شده دارد (شکل ۱-۴). در حوالی صفر مطلق مواد پارامغناطیس می توانند به اشباع مغناطیسی برسند. در واقع دما و میدان مغناطیسی خارجی در رقابت هستند که روی گشتاورهای مغناطیسی تأثیر بگذارند. دما در کاتوره ای کردن توزیع گشتاورها و میدان در هم جهت کردن آنها. گشتاورهای مغناطیسی می تواند طبیعت جایگزیده یا سیار داشته باشند. گشتاورهای جایگزیده ناشی از الکترون های پوسته های داخلی هستند که به

^۱ Diamagnet materials

^۲ Paramagnet materials

طور جزئی پر شده‌اند. مثال‌های نوعی عبارتند از الکترون‌های f در فلزات خاک‌های نادر و الکترون‌های f در اکتانیدها. این دسته از مواد پارامغناطیس لنجوين را نمایش می‌دهند. پذیرفتاری پارامغناطیس لنجوين به دما بستگی دارد و در دماهای بالا قانون کوری معتبر است (شکل ۴-۱).

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



شکل ۴-۱: منحنی وابستگی دمایی عکس پذیرفتاری مغناطیسی پارامغناطیس لنجوين [۶]

گشتاورهای سیار ناشی از الکترون‌های آزاد در نوار ظرفیت هستند که حامل یک گشتاور مغناطیسی دائمی ۱ مگنتون بوهر هستند. این نوع از مواد پارامغناطیس پائولی نامیده می‌شوند. پذیرفتاری متناظر تقریباً مستقل از دما است (شکل ۳-۱).

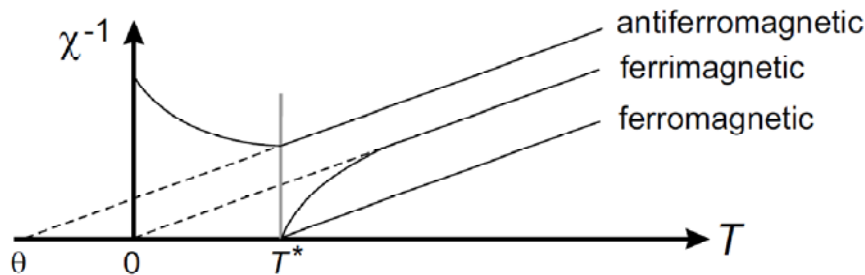
$$\frac{\partial \chi^{Pauli}}{\partial T} \cong 0 \quad (5-1)$$

اندازه پذیرفتاری لنجوين و پائولی خیلی متفاوت است. به طوری که:

$$\chi^{Pauli} \ll \chi^{Langvin} \quad (6-1)$$

ت. مواد فرومغناطیس^۱

این مواد حتی در غیاب میدان خارجی سعی در موازی کردن گشتاور مغناطیسی اتم‌های مجاور داشته و یک نظم مغناطیسی موسوم به نظم فرومغناطیسی به وجود می‌آورند. این نظم ناشی از نیروهای تبدالی بین اسپین الکترون‌های اتم‌های مجاور می‌باشد. در مواد فرومغناطیس مقدار χ_m عددی مثبت و از مرتبه چند صد تا چند میلیون است. χ_m به درجه حرارت وابسته است. با افزایش درجه حرارت خواص مغناطیسی ضعیف شده و سرانجام بسته به جنس ماده فرومغناطیس، در یک درجه حرارت معین موسوم به دمای کوری T_C خواص فرومغناطیس از بین رفته و رفتار آن از لحاظ مغناطیسی مشابه رفتار مواد پارامغناطیس می‌شود (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵: منحنی وابستگی دمایی عکس پذیرفتاری مغناطیسی برای مواد فرو و فری و پادفرومغناطیس. T^* دمای بحرانی است [۳].

ث. مواد پادفرومغناطیس^۲

در این مواد χ_m عددی مثبت و بین 10^{-5} تا 10^{-3} می‌باشد. χ_m به طرز خاصی به حرارت وابسته است. با افزایش درجه حرارت از صفر مطلق، χ_m به طور یکنواخت زیاد می‌شود. در دمایی موسوم به دمای نیل، که آن را با T_N نمایش می‌دهند، به مقدار حداکثر خود می‌رسد.

^۱ Ferromagnet materials

^۲ Antiferromagnet materials

دمای نیل دمایی است که در آن دما خواص مغناطیس‌زدا در جسم به حداقل رسیده‌اند. با افزایش دما از دمای نیل، مقدار χ_m از قانون کوری پیروی کرده و شروع به کاهش می‌کند (شکل ۵-۱). در مواد پادفرومغناطیس دارای دو شبکه فرعی مغناطیسی هستیم. به قسمی که گشتاور مغناطیسی حوزه‌های متعلق به هر کدام از دو شبکه مزبور پادموازی بوده و اثر مغناطیسی یکدیگر را به طور قابل توجهی از بین می‌برند. مواد پادفرومغناطیس را مواد فری‌مغناطیس جبران شده^۱ می‌مانند.

ج. مواد فری‌مغناطیس^۲

در این مواد اگر چه حوزه‌ها به یا چند گروه پادموازی تقسیم می‌شوند، ولی گشتاور مغناطیسی برآیند مقدار قابل توجهی داشته و مشابه با مواد فرومغناطیس دارای نفوذپذیری مغناطیسی بزرگی هستند. به عبارت دیگر χ_m یک عدد مثبت و خیلی بزرگتر از واحد است. با افزایش دما نظم فری‌مغناطیسی کاهش می‌یابد. دمایی که در آن دما مغناطش خود به خودی در جسم فری‌مغناطیس از بین می‌رود، دمای فری‌مغناطیس نیل نامیده می‌شود و آن را با T_{FN} نمایش می‌دهند (شکل ۵-۱). مواد فری‌مغناطیس را مواد پادفرومغناطیس جبران نشده^۳ نیز می‌نامند.

مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و پادفرومغناطیس را می‌توان در گروه مواد دارای خواص مغناطیسی ضعیف و مواد فرومغناطیس و فری‌مغناطیس را در گروه مواد دارای خواص مغناطیسی قوی قرار داد. دو گروه مغناطیس‌های سرامیکی یعنی فریت‌ها و لعل‌ها بر خلاف مواد فرومغناطیسی فلزی و آلیاژهای آن‌ها، دارای مقاومت الکتریکی بزرگی هستند و به همین جهت در میدان‌های متغیر با زمان نسبت به مواد فرومغناطیس فلزی، تلفات انرژی ناشی از جریان‌های گردابی ناچیز است. تلفات مزبور متناسب با مجذور فرکانس میدان است. لذا اهمیت کوچک بودن

^۱ Compensated ferrimagnet

^۲ Ferrimagnet materials

^۳ Noncompensated antiferromagnet