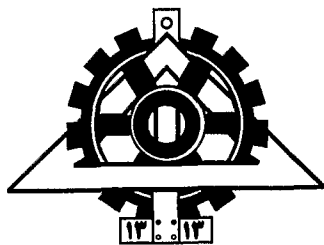


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده های فنی

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد



عنوان:

مطالعه تأثیر فعال سازی میانی بر سنتز نانوذرات هگزا فریت باریم

نگارش:

سلماز جهانگیر

استاد راهنما:

دکتر ابوالقاسم عطائی

استاد مشاور:

دکتر سیدفرشید کاشانی بزرگ

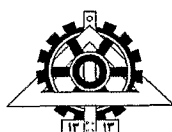
۱۳۸۷ / ۱ / ۲۳

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مواد - گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی

بهمن ماه ۱۳۸۶

۹۳۸۵۷



تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب سلماز جهانگیر تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی این جانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: سلماز جهانگیر

امضاء دانشجو:

تقدیم بہ
پدر و مادر عزیزم

تقدیم و تشکر

با سپاس از ایزد منان که توانایی انجام این پژوهش را به من عطا فرمود، اکنون که به مدد توفیق الهی بخشی از راه بلند و بی‌پایان کسب علم به سر آمده، بر خود لازم می‌دانم از همه کسانی که مرا در این مسیر یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. سپاس و تشکر قلبی خود را خدمت استاد گرامی و ارجمندم جناب آقای دکتر عطایی که صبر و تحمل و حمایت و هدایت ایشان در به انجام رسیدن این پژوهش برجسته‌ترین نقش را داشت ابراز می‌دارم و از پروردگار متعال طول عمر و توفیق روز افزون برای ایشان آرزو مندم. همچنین از آقای دکتر کاشانی بزرگ که مسئولیت مشاوره این پژوهش را عهده‌دار بودند از صمیم قلب سپاسگزارم و از آقایان دکتر عبدی‌زاده و دکتر مداح حسینی به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان و قبول زحمت بازخوانی متن پژوهش ممنون و قدردانم.

همچنین از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو که این پژوهش را مورد حمایت‌های تشویقی قرار دادند سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده:

در پژوهش حاضر نانوذرات هگزاآفریت باریم با استفاده از مواد اولیه اکسید آهن (هماتیت) و کربنات باریم به روش مرسوم همراه با فرآیند آسیاکاری میانی سنتز شدند و ضمن بررسی تأثیر فرآیند آسیاکاری با افزودن عوامل کنترل کننده فرآیند به مواد اولیه، عملکرد این مواد نیز در سنتز فاز مغناطیسی هگزاآفریت باریم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش از ۳٪ وزنی اتانول، پلی‌وینیل‌الکل، اسید استئاریک و کلرید سدیم به عنوان عوامل کنترل فرآیند حین آسیاکاری استفاده شد. بررسی رفتار حرارتی، ترکیب فازی، مورفولوژی و خواص مغناطیسی محصولات به ترتیب توسط دستگاه‌های TEM، SEM، XRD، DTA/TG و VSM انجام گرفت. در تمامی نمونه‌های آسیا شده بجز نمونه آسیا شده در حضور پلی‌وینیل‌الکل، پس از ۱۰ ساعت آسیاکاری فاز کربنات باریم به طور کامل تجزیه شد. اثر فعال‌سازی میانی بصورت کاهش دمای تشکیل هگزاآفریت باریم از 900°C در نمونه آسیا نشده، به 825°C در نمونه آسیا شده بدون PCA مشاهده شد. بررسی نتایج حاصل از نمونه‌های آسیا شده با PCAهای مختلف نشان داد که پلی‌وینیل‌الکل سینتیک واکنش تشکیل هگزاآفریت باریم را کند می‌کند و کلرید سدیم به عنوان موثرترین عامل در کاهش اندازه کریستالیت‌ها و افزایش سینتیک واکنش تشکیل هگزاآفریت باریم شناخته شد. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری اندازه کریستالیت‌ها در نمونه آسیا شده با کلرید سدیم و کلسینه شده در 1000°C ، ۲۵-۳۰ nm اندازه‌گیری شد. در همین نمونه مقدار وادارندگی مغناطیسی $4/3$ kOe و مغناطش اشباع برابر $52/7$ emu/g بود.

صفحه	عنوان
۲	فصل اول- مقدمه
۴	فصل دوم- مروری بر منابع مطالعاتی
۴	۱-۲- مروری بر پارامترهای مغناطیسی
۴	۱-۱-۲- میدان مغناطیسی
۴	۲-۱-۲- القای مغناطیسی
۴	۳-۱-۲- گشتاور مغناطیسی
۵	۴-۱-۲- شدت مغناطش
۵	۵-۱-۲- نفوذپذیری و پذیرفتاری مغناطیسی
۵	۲-۲- حلقه پسماند مواد مغناطیسی
۶	۳-۲- انواع ناهمسانگردی
۶	۱-۳-۲- ناهمسانگردی مغناطو کریستالی
۸	۲-۳-۲- ناهمسانگردی شکلی
۹	۳-۳-۲- ناهمسانگردی تنشی
۱۰	۴-۲- حوزه‌های مغناطیسی
۱۰	۱-۴-۲- دیواره حوزه‌ها
۱۱	۲-۴-۲- نیروی وادارندگی مغناطیسی
۱۱	۵-۲- انواع رفتارهای مغناطیسی
۱۴	۶-۲- مواد مغناطیسی نرم و سخت
۱۴	۷-۲- تأثیر کاهش اندازه ذرات بر روی خواص فیزیکی نانو ذرات
۱۵	۸-۲- سرامیک‌های مغناطیسی (فریت‌ها)
۱۶	۱-۸-۲- فریت‌های هگزاگونال
۱۷	۲-۸-۲- فریت‌های مکعبی
۱۷	۳-۸-۲- گارنت‌ها
۱۸	۹-۲- روش‌های فرآوری هگزا فریت باریم
۱۸	۱-۹-۲- روش مرسوم
۱۸	۱-۱-۹-۲- انتخاب مواد اولیه
۱۹	۲-۱-۹-۲- نسبت مولی اجزاء تشکیل دهنده هگزا فریت
۱۹	۳-۱-۹-۲- مخلوط سازی پودرها
۱۹	۴-۱-۹-۲- کلسینه کردن
۲۱	۲-۹-۲- روش‌های غیر مرسوم

۲۱	..... ۱۰-۲- آلیاژسازی مکانیکی
۲۲	..... ۱-۱۰-۲- تاریخچه
۲۳	..... ۲-۱۰-۲- فرآیند آسیاکردن
۲۵	..... ۱-۲-۱۰-۲- عوامل کنترل کننده فرآیند
۲۸	..... ۳-۱۰-۲- فعال سازی مکانیکی جامدات
۳۱	..... ۴-۱۰-۲- کاربرد آلیاژسازی مکانیکی در تهیه هگزا فریت های نوع MI
۳۵	..... فصل سوم- روش تحقیق
۳۵	..... ۱-۳- مواد اولیه مورد استفاده
۳۶	..... ۲-۳- تهیه پودر هگزا فریت باریم به روش مرسوم و آسیاکاری میانی
۳۷	..... ۳-۳- تجهیزات مورد استفاده برای ارزیابی خواص
۴۱	..... فصل چهارم- نتایج و بحث
۴۱	..... ۱-۴- سنتز پودر هگزا فریت باریم به روش مرسوم و بررسی تأثیر فعال سازی مکانیکی
۴۱	..... ۱-۱-۴- نمونه های آسیا نشده
۴۱	..... ۱-۱-۱-۴- بررسی رفتار حرارتی
۴۲	..... ۲-۱-۱-۴- بررسی ترکیب فازی
۴۳	..... ۳-۱-۱-۴- بررسی مورفولوژی
۴۳	..... ۲-۱-۴- نمونه های آسیا شده
۴۳	..... ۱-۲-۱-۴- بررسی رفتار حرارتی
۴۴	..... ۲-۲-۱-۴- بررسی ترکیب فازی
۴۹	..... ۳-۲-۱-۴- بررسی مورفولوژی و اندازه کریستالیت ها
۵۰	..... ۳-۱-۴- جمع بندی
۵۰	..... ۲-۴- بررسی تأثیر افزودن PCA در فرآیند فعال سازی مکانیکی
۵۰	..... ۱-۲-۴- نمونه های آسیا شده با اتانول
۵۰	..... ۱-۱-۲-۴- بررسی رفتار حرارتی
۵۲	..... ۲-۱-۲-۴- بررسی ترکیب فازی
۵۶	..... ۳-۱-۲-۴- بررسی مورفولوژی و اندازه کریستالیت ها
۵۷	..... ۲-۲-۴- نمونه های آسیا شده با پلی وینیل الکل
۵۷	..... ۱-۲-۲-۴- بررسی رفتار حرارتی
۵۸	..... ۲-۲-۲-۴- بررسی ترکیب فازی
۶۳	..... ۳-۲-۲-۴- بررسی مورفولوژی و اندازه کریستالیت ها
۶۴	..... ۳-۲-۴- نمونه های آسیا شده با اسید استئاریک

۶۴	..... بررسی رفتار حرارتی ۱-۳-۲-۴
۶۵	..... بررسی ترکیب فازی ۲-۳-۲-۴
۷۰	..... بررسی مورفولوژی و اندازه کریستالیت‌ها ۳-۳-۲-۴
۷۱	..... نمونه‌های آسیا شده با کلرید سدیم ۴-۲-۴
۷۱	..... بررسی رفتار حرارتی ۱-۴-۲-۴
۷۲	..... بررسی ترکیب فازی ۲-۴-۲-۴
۷۷	..... بررسی مورفولوژی و اندازه کریستالیت‌ها ۳-۴-۲-۴
۷۸	..... جمع‌بندی ۵-۲-۴
۸۱	..... بررسی مشخصات نمونه بهینه ۳-۴
۸۵	..... فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱-۵
۸۵	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری ۱-۵
۸۶	..... ۲-۵ پیشنهادات ۲-۵
۸۷	..... منابع و مراجع ۸۷

صفحه	عنوان
۶	شکل (۱-۲) تصویر شمتایک حلقه پسماند مواد فرو یا فری مغناطیس
۱۰	شکل (۲-۲) تغییرات در ساختار حوزه مغناطیسی بر حسب تابعی از میدان اعمال شده
۱۳	شکل (۳-۲) جهت گشتاورهای مغناطیسی اتمی در انواع مواد مغناطیسی
۲۲	شکل (۴-۲) اصل اول افزایش انرژی و کوئنچ کردن برای تولید مواد شبه تعادلی
۲۸	شکل (۵-۲) تصویر TEM پودرهای FeS_2 (a) آسیا شده بدون افزودنی و (b) آسیا شده با NaCl
۳۰	شکل (۶-۲) شمائی از برخورد متقابل گلوله-پودر-گلوله در طول فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۳۷	شکل (۱-۳) دستگاه آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای مورد استفاده
۴۲	شکل (۱-۴) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG مخلوط اولیه $(BaCO_3+5.5Fe_2O_3)$ آسیا نشده
۴۲	شکل (۲-۴) الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط اولیه $(BaCO_3+5.5Fe_2O_3)$ آسیا نشده
۴۳	شکل (۳-۴) تصویر SEM مخلوط اولیه $(BaCO_3+5.5Fe_2O_3)$ آسیا نشده
۴۴	شکل (۴-۴) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت
۴۵	شکل (۵-۴) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ ساعت
۴۶	شکل (۶-۴) اثر آسیای پر انرژی بر پیک (۱۱۶) هماتیت در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت
۴۸	شکل (۷-۴) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های ۱۰ آسیا شده و کلسینه شده در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و $1000^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت
۴۹	شکل (۸-۴) تصویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده و کلسینه شده در دمای $1000^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت
۵۱	شکل (۹-۴) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی اتانول
۵۳	شکل (۱۰-۴) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی اتانول
۵۴	شکل (۱۱-۴) اثر آسیای پر انرژی بر پیک (۱۱۶) هماتیت در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی اتانول
۵۵	شکل (۱۲-۴) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی اتانول و کلسینه شده در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و $1000^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت
۵۶	شکل (۱۳-۴) تصویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی اتانول و کلسینه شده در دمای $1000^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت
۵۸	شکل (۱۴-۴) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی پلی‌وینیل‌الکل
۵۹	شکل (۱۵-۴) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی پلی‌وینیل‌الکل
۶۰	شکل (۱۶-۴) اثر آسیای پر انرژی بر پیک (۱۱۶) هماتیت در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آسیا

- شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی پلی‌وینیل‌الکل
 شکل (۴-۱۷) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی پلی-
 ۶۲ وینیل‌الکل و کلسینه شده در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۱۸) تصویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی پلی‌وینیل‌الکل و
 ۶۳ کلسینه شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۱۹) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪
 ۶۵ وزنی اسید استتاریک
 شکل (۴-۲۰) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ و
 ۶۶ ساعت در حضور ۳٪ وزنی اسید استتاریک
 شکل (۴-۲۱) اثر آسیای پر انرژی بر پیک (۱۱۶) هماتیت در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آسیا
 ۶۷ شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی اسید استتاریک
 شکل (۴-۲۲) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی اسید
 ۶۹ استتاریک و کلسینه شده در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۲۳) تصویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی اسید استتاریک و
 ۷۰ کلسینه شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۲۴) نمودار آنالیز حرارتی DTA/TG نمونه آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪
 ۷۲ وزنی کلرید سدیم
 شکل (۴-۲۵) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ و
 ۷۳ ساعت در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم
 شکل (۴-۲۶) اثر آسیای پر انرژی بر پیک (۱۱۶) هماتیت در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آسیا
 ۷۴ شده به مدت ۱۰ ساعت در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم
 شکل (۴-۲۷) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی کلرید
 ۷۶ سدیم و کلسینه شده در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۲۸) تصویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم و
 ۷۷ کلسینه شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۲۹) تصویر TEM نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم و کلسینه
 ۸۲ شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۳۰) تصویر TEM نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم و کلسینه
 ۸۲ شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت
 شکل (۴-۳۱) حلقه پسماند برای نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده در حضور ۳٪ وزنی کلرید سدیم و
 ۸۳ کلسینه شده در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۱ ساعت



صفحه	عنوان
۸	جدول (۱-۲) مقدار k_1 برای چند فریت مهم
۹	جدول (۲-۲). مقدار λ_m برای چند فریت پلی کریستاله
۱۷	جدول (۳-۲) خواص فیزیکی هگزا فریت باریم، استرانسیم و سرب
۲۶	جدول (۴-۲) برخی عوامل کنترل کننده فرآیند و خواص عمومی آنها
۳۶	جدول (۱-۳) مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده
۵۰	جدول (۱-۴) میانگین اندازه کریستالیت‌های پودرهای ۱۰ ساعت آسیا شده و کلسینه شده در دماهای مختلف به مدت ۱ ساعت
۵۷	جدول (۲-۴) میانگین اندازه کریستالیت‌های پودرهای ۱۰ ساعت آسیا شده با اتانول و کلسینه شده در دماهای مختلف به مدت ۱ ساعت
۶۳	جدول (۳-۴) میانگین اندازه کریستالیت‌های پودرهای ۱۰ ساعت آسیا شده با پلی‌وینیل‌الکل و کلسینه شده در دماهای مختلف به مدت ۱ ساعت
۷۱	جدول (۴-۴) میانگین اندازه کریستالیت‌های پودرهای ۱۰ ساعت آسیا شده با اسید استئاریک و کلسینه شده در دماهای مختلف به مدت ۱ ساعت
۷۸	جدول (۵-۴) میانگین اندازه کریستالیت‌های پودرهای ۱۰ ساعت آسیا شده با کلرید سدیم و کلسینه شده در دماهای مختلف به مدت ۱ ساعت
۷۸	جدول (۶-۴) مقایسه پارامترهای مختلف در نمونه‌های آسیا شده با/ بدون PCA

فصل اول:

مقدم



نانو فن آوری، بهره‌برداری از مواد، قطعات و سیستم‌ها از طریق کنترل ماده در مقیاس نانومتری یعنی همان سطح اتمی و مولکولی می‌باشد. این فناوری یک روش مناسب برای ساخت و سرهم بندی ساختارهای کارآمد دارای حداقل یک بعد نانومتری است. چنین سیستم‌ها و موادی به دلیل اندازه‌شان دارای خصوصیات و رفتارهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی جدید و بهبود یافته‌ای می‌باشند. اشیاء در این محدوده اغلب رفتار فیزیکی بسیار متفاوتی با اتم‌ها و مواد توده‌ای از خود نشان می‌دهند. امروزه توسعه و گسترش نانوذرات به شدت مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است که نه تنها به دلیل جاذبه‌های علمی این ذرات، بلکه به دلیل کاربردهای تکنولوژیکی فراوانشان می‌باشد.

در تمامی کاربردهای پیش‌بینی شده برای این ذرات، روش سنتز آنها تعیین کننده مرغوبیت و نحوه کارکردشان است. روش‌های گوناگون و متعددی برای سنتز نانوذرات وجود دارد که کلیه این روش‌ها را می‌توان در سه دسته واکنش‌های شیمیایی، مکانیکی و مکانیکی - شیمیایی تقسیم بندی کرد. همان گونه که اشاره شد خواص مغناطیسی نانو ذرات با حالت توده‌ای همان نوع ماده تفاوت‌های زیادی دارد. نانوذرات فریتی در محیط‌های ذخیره سازی اطلاعات، فرولویدها، عوامل افزایش دهنده کیفیت تصاویر MRI، انتقال هوشمند دارو داخل بدن، در تشخیص بیماری‌ها... کاربردهای فراوانی دارند و از این جهت بررسی خواص مغناطیسی این ذرات بسیار ریز اهمیت فوق‌العاده می‌یابد. لازم به ذکر است که مشابه حالت بالک، خواص نانوذرات را باید متناسب با نیازهای کاربردی تنظیم کرد و همین ویژگی‌هاست که روش سنتز و عملیات بعدی روی پودر را تعیین می‌کند.

هگزافریت‌ها مواد مغناطیسی دائمی با ساختار کریستالی هگزاگونال و فرمول شیمیایی $MO_6Fe_2O_3$ (M: Sr, Ba یا Pb) می‌باشند. در سال ۱۹۱۳ مشاهده شد که مخلوط حرارت داده شده اکسید باریم و اکسید آهن دارای خاصیت مغناطیسی نسبتاً خوبی است. تحقیقات بعدی نشان داد که $MO_6Fe_2O_3$ دارای ساختار کریستالی مگنتوپلمبیت^۱ می‌باشد و در سال ۱۹۴۶ این ماده از مخلوط اکسید آهن و کربنات باریم تهیه گردید [۱].

در این تحقیق برای تهیه نانو ذرات هگزافریت باریم از روش مرسوم به همراه فعال‌سازی میانی استفاده شده و ضمن بررسی تأثیر فرآیند آسیاکاری با افزون عوامل کنترل کننده فرآیند به مواد آسیا شونده، عملکرد این مواد نیز در سنتز فاز مغناطیسی هگزافریت باریم مورد ارزیابی قرار گرفته است.

فصل دوم:

مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱- مروری بر پارامترهای مغناطیسی

۲-۱-۱- میدان مغناطیسی^۱

اثراتی که یک آهنربا در فضای اطراف خود ایجاد می‌کند را میدان مغناطیسی می‌گویند که ناشی از دوقطبی‌های مغناطیسی می‌باشد. این میدان به وسیله حرکت بار الکتریکی و یا توسط یک آهنربا ایجاد می‌گردد. در سیستم واحدهای cgs شدت میدان (H)، برابر تعداد خطوط نیرو است که از واحد سطح عمود بر میدان عبور می‌کند. واحد شدت میدان در سیستم cgs، ارستد (Oe) می‌باشد [۲].

۲-۱-۲- القای مغناطیسی^۲

پاسخ محیط به میدان اعمالی (H) را با القا یا شار مغناطیسی (B) نشان می‌دهند. اگر به یک قطعه مغناطیس نشده میدان اعمال شود، در این قطعه میدان مغناطیسی القا می‌شود و قطب‌های مغناطیسی تشکیل می‌گردند. در سیستم MKS واحد چگالی شار، وبر بر مترمربع می‌باشد که تسلا نامیده می‌شود. در خلا رابطه بین B و H به صورت زیر است [۲].

$$B = \mu_0 H \quad (1-2)$$

که μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلا می‌باشد. در اغلب موارد به ویژه در مواد فرومغناطیس و فری‌مغناطیس، B تابع خطی از H نیست و از رابطه (۲-۲) پیروی می‌کند. μ قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی ماده می‌باشد که لزوماً ثابت نیست [۲].

$$B = \mu H \quad (2-2)$$

۲-۱-۳- گشتاور مغناطیسی^۳

خاصیت آهنربائی هر آهنربا، به علت وجود گشتاورهای مغناطیسی می‌باشد. گشتاورهای مغناطیسی از حرکت الکترون‌ها ایجاد می‌شوند. الکترون به دو صورت حرکت به دور هسته و حرکت وضعی به دور خودش می‌تواند حرکت کند. حرکت الکترون به دور هسته باعث ایجاد گشتاور مغناطیسی اربیتال^۴ و حرکت وضعی به دور خودش باعث ایجاد گشتاور مغناطیسی اسپینی^۵ می‌گردد [۲].

1- Magnetic Field
4- Orbital Magnetic Moment

2- Magnetic Induction
5- Spin Magnetic Moment

3- Magnetic Moment

۲-۱-۴- شدت مغناطش^۱

تعداد گشتاورهای مغناطیسی در واحد حجم را شدت مغناطش می‌گویند و به صورت زیر نشان می‌دهند:

$$M = \frac{m}{V} \quad (۳-۲)$$

که m گشتاور مغناطیسی، V حجم ماده و M شدت مغناطش می‌باشد. در سیستم cgs واحد M برابر با erg/Oe.cm^3 می‌باشد که به اختصار emu/cm^3 نوشته می‌شود. emu متوسط واحد الکترومغناطیس گشتاور مغناطیسی است. در ضمن رابطه بین سه پارامتر اصلی مغناطیس یعنی B ، H و M در سیستم MKS به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (۴-۲)$$

که B بر حسب تسلا و H و M بر حسب آمپر بر متر (emu/cm^3) می‌باشند [۲].

۲-۱-۵- نفوذپذیری^۲ و پذیرفتاری مغناطیسی^۳

نفوذپذیری (μ) و پذیرفتاری مغناطیسی (χ)، دو پارامتر مهم در طبقه بندی مواد مغناطیسی هستند. نفوذپذیری مغناطیسی معیار سهولت عبور خطوط نیروی مغناطیسی از داخل یک جسم به ازای نیروی مغناطیس کننده ثابت و پذیرفتاری مغناطیسی برابر با نسبت شدت مغناطش به میدان اعمالی می‌باشد. معمولاً دانشمندان فیزیک از پذیرفتاری مغناطیسی و مهندسیین از نفوذپذیری مغناطیسی برای طبقه بندی مواد از لحاظ خاصیت مغناطیسی استفاده می‌کنند [۲].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (۵-۲)$$

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (۶-۲)$$

۲-۲- حلقه پسماند مواد مغناطیسی^۴

اگر ماده بدون خاصیت مغناطیسی باشد، میدان مغناطیسی اعمال شده باعث می‌شود که گشتاورهای مغناطیسی ماده در جهت میدان قرار بگیرد. هنگامی که همه گشتاورهای مغناطیسی ماده در راستای میدان اعمال شده خارجی قرار بگیرد، اشباع رخ داده است (شکل ۲-۱). حال اگر میدان اعمالی کاهش

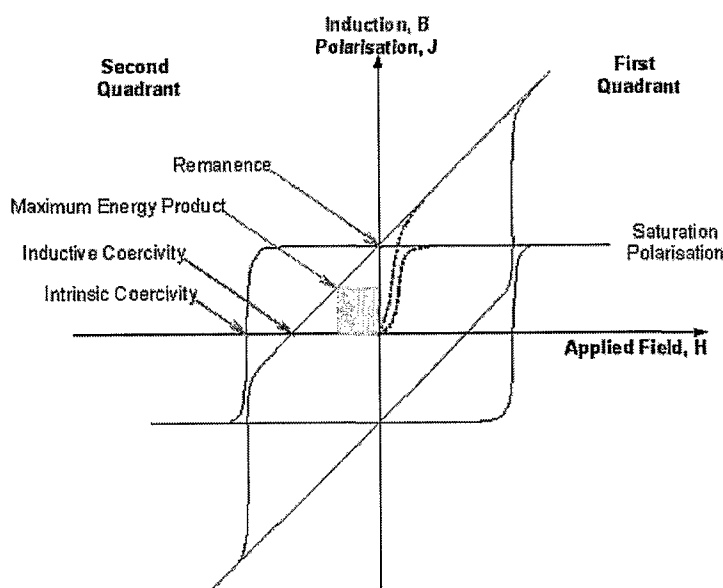
1- Intensity of Magnetisation

2- Permeability

3- Magnetic Susceptibility

4- Remanence Loop in Magnetic Materials

یابد تا به صفر برسد، مقداری از گشتاورها در جهت میدان باقی خواهد ماند که نمایانگر پسماند مغناطیسی (B_r) می‌باشد. پسماند مغناطیسی، نشان دهنده مقدار القای مغناطیسی است که در جسم باقی می‌ماند. میدان منفی لازم برای حذف خاصیت مغناطیسی (یعنی به صفر رساندن گشتاور خالص مغناطیسی در ماده) را نیروی وادارندگی مغناطیسی^۱ (H_c) می‌نامند. کلاً دو نوع حلقه پسماند وجود دارد. اگر B بر حسب H رسم شود حلقه القای نرمال^۲ و اگر B_i ($B_i = B - H = 4\pi M$) بر حسب H رسم شود، حلقه القای ذاتی^۳ بدست می‌آید [۲].



شکل (۱-۲) تصویر شماتیک حلقه پسماند مواد فرو یا فری مغناطیس.

۲-۳- انواع ناهمسانگردی^۴

۲-۳-۱- ناهمسانگردی مغناطو کریستالی

یک الکترون با حرکت اسپینی را در حالتی که هیچ عامل محدودکننده‌ای اطراف آن نباشد، می‌توان با اعمال یک میدان بی نهایت کوچک، هم راستای میدان کرد که این بر نفوذپذیری نامحدود میدان دلالت دارد. اما محدودیتی که در مواد مغناطیسی باعث می‌شود تا نفوذپذیری یک مقدار مشخص و معین داشته باشد، نتیجه تزویجی است که بین حرکت اسپینی الکترون و شبکه کریستالی ماده تحت اثر حرکت اربیتال الکترون بوجود می‌آید. تزویج الکترونی اسپین - اربیتال - شبکه باعث می‌شود تا

1- Magnetic Coercive Force
4- Anisotropy

2- Normal Induction Loop

3- Intrinsic Induction Loop

حرکت اسپینی الکترون در جهتی صورت گیرد که کمترین انرژی ممکن به شبکه اعمال شود. این جهت، جهت آسان مغناطیسی نامیده می‌شود. قرار گرفتن جهت حرکت اسپین‌ها در هر جهت دیگری باعث اضافه شدن مقدار انرژی بیشتری به شبکه می‌گردد که با E_k نشان داده می‌شود و انرژی ناهمسانگردی نام دارد. برای یک شبکه مکعبی مثل اسپینل، این انرژی به دو ثابت k_1 و k_2 ارتباط پیدا می‌کند:

$$E_k = k_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + k_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \quad (7-2)$$

که α_1 ، α_2 و α_3 کسینوس زاویه بین بردار مغناطیس شونده‌گی و محورهای کریستالوگرافی می‌باشند. ثابت k_2 معمولاً مقدار کوچکی است و قابل صرف نظر می‌باشد. اگر k_1 عدد مثبتی باشد مینی‌م E_k صفر است که با صفر بودن دو تا از سه متغیر α_1 ، α_2 و α_3 رخ می‌دهد. یعنی هر سه محور مختصات جهات آسان مغناطیسی‌اند و اگر k_1 منفی باشد می‌نیمم E_k هنگامی رخ می‌دهد که $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$. یعنی جهت آسان، قطر شبکه است.

پس تعریف ساده انرژی ناهمسانگردی مغناطوکریستالی را می‌توان به صورت مقدار اختلاف انرژی در به اشباع رساندن مغناطیسی ماده در جهات سخت و آسان ارائه داد. به عبارتی اگر گشتاورهای مغناطیسی حوزه‌های مختلف را در نظر بگیریم برای قرار گرفتن آنها در شبکه جهات سخت و آسان وجود دارد. انرژی ناهمسانگردی مغناطوکریستالی این تصویر را به ما می‌دهد که اگر گشتاورها در حالت حداقل انرژی خود هستند و به اجبار یک میدان می‌خواهیم آنها را تغییر جهت دهیم چقدر انرژی لازم است.

با در نظر گرفتن معیار انرژی ناهمسانگردی مغناطوکریستالی می‌توان مواد نرم مغناطیس و سخت مغناطیس را تعریف کرد. مواد مغناطیسی نرم موادی هستند که به آسانی تحت اثر میدان خارجی، مغناطیسی می‌شوند و پس از حذف میدان خاصیت خود را به آسانی از دست می‌دهند. این مواد عمدتاً به صورت هسته‌های ترانسفورماتورها، الکتروموتورها، ژنراتورها و ... به کار می‌روند. در همه این کاربردها نفوذپذیری بالایی نیاز است. در مقابل مواد سخت مغناطیس قرار دارند که به سختی مغناطیسی شده و با حذف میدان خاصیت خود را تا حد زیادی حفظ می‌کنند. وادارندگی مغناطیسی (H_c) مواد سخت بزرگتر از نرم است. حال اگر انرژی ناهمسانگردی مغناطوکریستالی را معادل با یک انرژی داخلی که به اندازه آن انرژی، اسپین به شبکه کوپل شده است در نظر بگیریم هر قدر این انرژی

بزرگتر باشد، تغییر جهت اسپین‌ها سخت‌تر خواهد شد. پس ماده سخت مغناطیس انرژی ناهمسانگردی مغناطو کریستالی بالایی دارد. اما در حالت نرم مغناطیس به دنبال موادی هستیم که انرژی ناهمسانگردی مغناطو کریستالی پایینی دارند و با اعمال یک میدان کوچک جهت اسپین آنها عوض می‌شود.

بزرگی این انرژی به عواملی وابسته می‌باشد. برای مثال با کاهش تقارن در سیستم کریستالی ماده انرژی ناهمسانگردی زیاد می‌شود. ترکیب شیمیایی و دما هم روی مقدار انرژی موثرند. از مباحث انجام شده قابل استنتاج است که جهت آسان برای کریستال‌های مکعبی شکل از جنس فریت، جهت [۱۱۱] است و تنها در فریت‌های شامل کبالت [۱۰۰] جهت آسان می‌باشد. در جدول (۱-۲) مقدار k_1 برای چند فریت مهم در دمای اتاق داده شده است.

جدول (۱-۲): مقدار k_1 برای چند فریت مهم.

Ferrite	K_1/kJm^{-3}
Fe_3O_4	-11
$\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{1.86}\text{O}_4$	-2.8
$\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$	+290
NiFe_2O_4	-6.2
CuFe_2O_4	-6.0
$\text{Mn}_{0.45}\text{Zn}_{0.55}\text{Fe}_2\text{O}_4$	-0.38
$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	-3
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	+330

۲-۳-۲- ناهمسانگردی شکلی

شکل ماده هم می‌تواند خاصیت مغناطیسی آن را تحت تأثیر قرار دهد. با تشکیل قطب‌های آزاد در یک ماده، نیروی وادارندگی مغناطیسی در آنها شکل می‌گیرد که جهت آن در جهت مخالف با جهت مغناطش درون ماده است. گاهی ممکن است این میدان آنقدر بزرگ شود که خاصیت مغناطیسی ماده را از آن بگیرد. علاوه بر شکل قطعه ریزساختار هم در بزرگی این انرژی نقش مؤثری دارد به طوری که تخلخ‌ها، میکروتُرک‌ها، فازهای غیرمغناطیسی، ناخالصی‌ها و ... درون ریزساختار همگی به تشدید نیروی وادارندگی مغناطیسی کمک می‌کنند.