



۲۸۰۷۲

به نام خداوند متعال
دانشکده مواد

۱۳۸۲ / ۵ / ۳۰

وزارت اطلاعات و امور علمی ایران
تیمبکستان

تأثیر دمای زیتترینگ بر ریزساختار و خواص مغناطیسی آهن ربای
Nd-Fe-B دارای عنصر افزودنی Ge

علی فلاح شیخلری

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

اساتید راهنما:

دکتر حسین عربی

دکتر علی بیت‌الهی

آذر ۱۳۸۱

۴۸۰۷۵

تقدیم به

پدرم ، که همواره در مسیر زندگی رهنمای راهم بوده

و

مادرم ، که گرمای وجودم از دامن پر مهر اوست

و

همسرم ، که نقش عشق را در وجودم حک کرد

چکیده:

آهنرباهای دائمی Nd-Fe-B ماکزیم انرژی تولیدی بالایی داشته و توسط فرآیندهای مختلفی مانند پرس داغ ، زینتر کردن ، ایجاد اتصال پلیمری پودر Nd-Fe-B و غیره تولید می‌شوند [۱]. در این تحقیق ، فرآیند زینترینگ در دماهای مختلف روی پودر آلیاژی $Nd_{12.9}Fe_{80.5}B_{6.6}$ جهت تولید آهنربای زینتری Nd-Fe-B انجام گرفت . سپس تأثیر دمای زینترینگ بر ساختار ، ریزساختار و خواص مغناطیسی آهن ربای Nd-Fe-B با ترکیب استوکیومتری $Nd_{12.9}Fe_{80.5}B_{6.6}$ با و بدون افزودنی 1wt%Ge مورد بررسی قرار گرفت . در ابتدا پودرهای $Nd_{12.9}Fe_{80.5}B_{6.6}$ همراه با مایع سیکلو هگزان در جار فولاد زنگ نزن با گلوله‌های فولاد سخت شده به مدت ۸ ساعت آسیاب شد . سپس پودرها خشک شده و توسط پرس تک‌جهتی تحت فشار 10 ton/cm^2 پرس شدند . آنگاه نمونه‌های پرس شده در دماهای 1100°C ، 1050°C ، 1150°C و 1100°C تحت گاز محافظ آرگون به مدت ۱/۵ ساعت زینتر شدند . روشهای اندازه‌گیری مختلفی مانند X-Ray Diffraction ، EDXA-SEM ، میکروسختی ، سنجش خواص مغناطیسی Vibrating Sample Magnetometer و تعیین دانسیته زینترینگ ، روی نمونه‌ها انجام گرفت . نتیجه آنالیز XRD بیانگر وجود فازهای $\alpha\text{-Fe}$ و ϕ می‌باشد . عدم تغییر ثوابت شبکه فاز تراگونال ϕ بر اثر انحلال عنصر Ge نسبت به نمونه‌های فاقد Ge بیانگر انحلال جزئی عنصر Ge در فاز ϕ است . نتیجه آنالیزهای EDXA-SEM و X-Ray Mapping بیانگر انحلال عنصر Ge در فاز غنی از Nd در مرز دانه است . نیز با افزایش دمای زینترینگ در نمونه‌های با و بدون Ge ، اندازه دانه بزرگ می‌شود و از طرف دیگر دانسیته نمونه‌ها به خاطر افزایش فاز مایع ، بیشتر می‌شود . بهترین خواص مغناطیسی در نمونه بدون Ge که در دمای 1100°C زینتر شده است ، بدست آمد .

تقدیر و تشکر:

از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر بیت‌اللهی و جناب آقای دکتر عربی که با قبول زحمات فراوان و با توصیه‌های بی‌دریغشان راهگشای مشکلات این تحقیق بوده‌اند و مهمتر از آن چگونگی زیستن را به من آموختند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

علاوه بر این جا دارد از همکاری و زحمات سرکار خانم مهندس صالح‌پور مسئول دستگاه *SEM*، سرکار خانم پری‌پور مسئول دفتر ریاست دانشکده، آقای کریمی مسئول سایت کامپیوتر، آقای ساری، آقای مهرجو و آقای سعادت تقدیر و تشکر کنم.

در نهایت از سرکار خانم مرجان مرتضایی مقدم که با صبر و حوصله خویش ویرایش پروژه را بر عهده گرفتند و کلیه دوستانی که به نوعی در به انجام رسانیدن این پروژه یاریم دادند تشکر کنم.

صفحه	فهرست مطالب
۱	مقدمه
۴	فصل اول: مروری بر منابع مطالعاتی
۴	۱-۱- رفتار فرو مغناطیسی مواد
۴	۱-۱-۱- ساختار حوزه مغناطیسی مواد
۴	۱-۱-۲- حرکت حوزه‌ها در اثر میدان مغناطیسی
۵	۱-۱-۳- خصوصیات مواد مغناطیسی دائمی
۵	۲-۱- معرفی آهنرباهای دائمی $Nd-Fe-B$
۶	۱-۲-۱- کاربردهای آهنرباهای دائمی $Nd-Fe-B$
۷	۱-۳- برخی روش‌های تولید پودر $Nd-Fe-B$
۷	۱-۳-۱- فرآیند HD
۷	۱-۳-۲- فرآیند $HDDR$
۸	۱-۴- ساختار کریستالی آهن ربای $Nd_2Fe_{14}B$
۹	۱-۵- بررسی پارامترهای مهم مغناطیسی
۱۲	۱-۶- نمودار فازی سیستم $Nd-Fe-B$
۱۴	۱-۷- بررسی ریزساختاری آهنربای $Nd-Fe-B$ زینتری
۱۷	۱-۸- طبقه‌بندی آلیاژهای $Nd-Fe-B$
۱۸	۱-۹- مقاومت به خوردگی آهنرباهای $Nd-Fe-B$
۱۹	۱-۱۰- تأثیر افزودنی‌های مختلف بر خواص مغناطیسی آهنرباهای $Nd-Fe-B$
۲۲	۱-۱۰-۱- تأثیر افزودنی عنصر Ge بر دانسیته زینترینگ $Nd-Fe-B$
۲۳	۱-۱۱- تأثیر دمای زینترینگ بر خواص مغناطیسی آلیاژ $Nd-Fe-B$
۲۳	۱-۱۲- روش‌های تولید آهن ربای دایم $Nd-Fe-B$
۲۴	۱-۱۲-۱- آهنرباهای دائمی $Nd-Fe-B$ زینتری
۲۴	۱-۱۲-۲- روش کشیدن مذاب (Melt Spun)
۲۷	فصل دوم: فعالیت‌های تجربی
۲۷	۱-۲- مواد مصرفی
۲۷	۲-۲- روش کار

۲۷	۱-۲-۲- انتخاب پودر آلیاژی
۳۱	۳-۲- فرآیند آماده‌سازی پودر آلیاژی
۳۱	۱-۳-۲- پودر آلیاژی بدون ژرمانیوم
۳۱	۲-۳-۲- پودر آلیاژی حاوی ژرمانیوم
۳۲	۳-۳-۲- فرآیند شکل‌دهی نمونه‌ها
۳۲	۴-۳-۲- زیتترینگ نمونه‌ها
۳۴	فصل سوم : نتایج آزمایشات
۳۴	۱-۳- اندازه‌گیری دانسیته
۳۴	۱-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۳۵	۲-۱-۳- نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۳۵	۲-۳- آنالیز دیفراکسیون اشعه ایکس (XRD)
۳۵	۱-۲-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۳۸	۲-۲-۳- نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۴۲	۴-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۴۳	۱-۴-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۴۹	۲-۴-۳- بررسی ریزساختار سطح شکست نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۵۱	۵-۳- تصویربرداری توسط دستگاه میکروسکوپ نوری
۵۱	۱-۵-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۵۲	۲-۵-۳- نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۵۳	۶-۳- اندازه‌گیری میکروسختی
۵۳	۱-۶-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۵۳	۲-۶-۳- نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۵۴	۷-۳- اندازه‌گیری خواص مغناطیسی
۵۴	۱-۷-۳- نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۵۴	۲-۷-۳- نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۵۶	فصل چهارم : بحث
۵۶	۱-۴- تأثیر دمای زیتترینگ بر دانسیته

۵۶	۴-۱-۱-نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۵۹	۴-۱-۲-نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۶۳	۴-۲-تأثیر دمای زینترینگ بر خواص مغناطیسی
۶۴	۴-۲-۱-نمونه‌های بدون ژرمانیوم
۶۴	۴-۲-۲-نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
۶۶	فصل پنجم: نتیجه‌گیری نهایی
۶۷	فصل ششم: پیشنهادات
۶۸	مراجع

- ۹ تصویر ۱-۱- طرح شماتیکی ساختار کریستالی $Fe_{14}R_2B$
- ۱۰ تصویر ۲-۱- میدان آنیزوتروپی ترکیبات مختلف $Fe_{14}R_2B$ بر حسب دما
- ۱۱ تصویر ۳-۱- مقدار آهنربایش اشباع ترکیبات مختلف کمیاب خاکی- فلز انتقالی- بور
- ۱۲ تصویر ۴-۱- دمای کوری ترکیبات کمیاب خاکی- فلز انتقالی- بور
- ۱۳ تصویر ۵-۱- تصویر لیکویدوس در سیستم Nd-Fe-B
- ۱۳ تصویر ۶-۱- مقطع ایزوترمال در سیستم Nd-Fe-B در $1000^\circ C$
- ۱۴ تصویر ۷-۱- مقطع عمودی دیاگرام فازی Nd-Fe-B در Nd:B=2:1
- ۱۵ تصویر ۸-۱- ریز ساختار آهنربای Nd-Fe-B (a : تجربی (b ایده آل
- ۱۷ تصویر ۹-۱- تابعیت دمایی H_c برای ترکیبات مختلف آهنربا
- ۲۱ تصویر ۱۰-۱- وابستگی H_c به مقدار افزودنی Ga یا Al
- ۲۱ تصویر ۱۱-۱- حلالیت Ga یا Al در \emptyset به عنوان تابعی از مقدار افزودنی Ga یا Al در آلیاژ
- ۲۲ تصویر ۱۲-۱- تأثیر افزودنی ژرمانیوم بر دانسیته سینترینگ
- ۲۳ تصویر ۱۳-۱- خواص مغناطیسی و دانسیته آهنربای $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ نسبت به دمای زینترینگ
- ۲۸ تصویر ۱-۲- طیف حاصل از آنالیز شیمیایی به روش EDXA از پودر آلیاژی
- ۲۸ جدول ۱-۲- درصد عناصر پودر آلیاژی حاصل از آنالیز شیمیایی به روش EDXA
- ۲۹ جدول ۲-۲- درصد وزنی عناصر موجود در پودر آلیاژی و روش تعیین آنها
- ۲۹ جدول ۳-۲- درصد اتمی عناصر موجود در پودر آلیاژی
- ۳۰ شکل ۲-۲- الگوی دیفراکسیون اشعه X پودر آلیاژی مصرفی
- ۳۰ شکل ۳-۲- تصویر SEI پودر Nd-Fe-B
- ۳۱ تصویر ۴-۲- طیف حاصل از آنالیز حرارتی پودر Nd-Fe-B
- ۳۲ تصویر ۵-۲- عکس دستگاه محفظه خلأ Glove Box
- ۳۳ جدول ۴-۲- نحوه نامگذاری نمونه‌های مختلف
- ۳۴ تصویر ۱-۳- تأثیر دمای زینترینگ بر درصد دانسیته تنوریک به تجربی نمونه‌های بدون ژرمانیوم
- ۳۵ تصویر ۲-۳- تأثیر دمای زینترینگ بر درصد دانسیته تنوریک به تجربی نمونه‌های حاوی ژرمانیوم
- ۳۶ تصویر ۳-۳- الگوی XRD نمونه Mag1000
- ۳۶ تصویر ۴-۳- الگوی XRD نمونه Mag1050
- ۳۷ تصویر ۵-۳- الگوی XRD نمونه Mag1100

۳۷	تصویر ۳-۶- الگوی XRD نمونه Mag1150
۳۸	تصویر ۳-۷ الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه‌های زینتری بدون ژرمانیوم و پودر Nd-Fe-B
۳۹	تصویر ۳-۸- الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه Ge1000
۳۹	تصویر ۳-۹- الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه Ge1050
۴۰	تصویر ۳-۱۰- الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه Ge1100
۴۰	تصویر ۳-۱۱- الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه Ge1150
۴۱	تصویر ۳-۱۲- الگوی دیفراکسیون اشعه X نمونه‌های زینتری حاوی ژرمانیوم و پودر Nd-Fe-B
۴۲	جدول ۳-۱- مقادیر ثوابت شبکه فاز تتراگونال Nd ₂ Fe ₁₄ B
۴۳	تصویر ۳-۱۳- تصویر S/I نمونه Mag1000
۴۳	تصویر ۳-۱۴- تصویر SEI نمونه Mag1050
۴۴	تصویر ۳-۱۵- تصویر BS نمونه Mag1100
۴۴	تصویر ۳-۱۶- تصویر BS نمونه Mag1150
۴۵	تصویر ۳-۱۷- الگوی X-Ray Map نمونه Mag1000
۴۶	تصویر ۳-۱۸- الگوی X-Ray Map نمونه Mag1150
۴۷	تصویر ۳-۱۹- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Mag1000
۴۷	تصویر ۳-۲۰- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Mag1050
۴۸	تصویر ۳-۲۱- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Mag1100
۴۸	تصویر ۳-۲۲- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Mag1150
۴۹	تصویر ۳-۲۳- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Ge1000
۴۹	تصویر ۳-۲۴- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Ge1050
۵۰	تصویر ۳-۲۵- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Ge1100
۵۰	تصویر ۳-۲۶- تصویر الکترونیهای ثانویه از سطح شکست نمونه Ge1150
۵۱	تصویر ۳-۲۷- الگوی X-Ray Map نمونه Ge1150
۵۲	تصویر ۳-۲۸- عکس نوری نمونه Mag1150
۵۲	تصویر ۳-۲۹- عکس نوری نمونه Ge1150
۵۳	جدول ۳-۲ میکروسختی نمونه Mag1150
۵۳	جدول ۳-۳ میکروسختی نمونه Ge1150
۵۴	جدول ۳-۴ خواص مغناطیسی نمونه‌های Mag1100 و Mag1150

۵۴	جدول ۳-۵-خواص مغناطیسی نمونه‌های <i>Ge1150</i> و <i>Ge1100</i>
۵۸	تصویر ۴-۱- آنالیز <i>EDXA</i> از فاز خاکستری رنگ نمونه بدون ژرمانیوم
۵۸	تصویر ۴-۲- آنالیز <i>EDXA</i> از فاز سفید رنگ نمونه بدون ژرمانیوم
۵۹	تصویر ۴-۳- آنالیز <i>EDXA</i> از فاز تیره رنگ نمونه بدون ژرمانیوم
۶۱	تصویر ۴-۴- آنالیز <i>EDXA</i> فاز مرزدانه‌ای نمونه <i>Ge1150</i>
۶۲	تصویر ۴-۵- دیاگرام دوتایی <i>Nd-Ge</i>

مقدمه:

کاربرد آهنرباهای دائمی در زمینه‌های مختلفی از قبیل وسایل الکترومکانیکی (موتورها، ژنراتورها و اکچویتورها)، ترانسفورماتورهای اکوستیک (بلندگوها، هدفون‌ها و میکروفون‌ها)، اتومبیل (بالابرشیشه و آنتن، تنظیم‌کننده هوا، موتور پمپ سوخت)، مصارف پزشکی (جداکننده‌های سلول سرطانی، قلب مصنوعی) و غیره آنها را همواره مورد توجه محققان و تولیدکنندگان قرار داده است [۲].

مواد مغناطیسی به دو دسته مواد سخت و نرم مغناطیس تقسیم می‌شوند که اختلاف آنها در پهنای منحنی هیستریزس و مقدار نیروی پسماندزدا H_C (Coercive field) آنها بوده بطوریکه مواد سخت مغناطیس یا آهنرباهای دائمی دارای منحنی هیستریزس پهن‌تری نسبت به مواد نرم مغناطیس می‌باشند. آهنرباهای Nd-Fe-B جزء دسته مواد سخت مغناطیس یا آهنرباهای دائمی می‌باشند. معروفترین آهنرباهای دائم به چهار گروه مهم ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]:

- هگزافریت‌ها شامل هگزافریت باریم و هگزافریت استرانسیم که در دهه ۱۹۵۰ معرفی شدند.
- آلنیکوها که خاصیت مغناطیسی‌شان بر اساس رسوب ذرات فرومغناطیس $FeCo$ می‌باشد و در دهه ۱۹۶۰ ساخته شدند.

- آلیاژهای کمیاب خاکی-کبالت بر پایه Sm-Co. در سیستم‌های $SmCo_5$ و Sm_2Co_{17} که در دهه ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفتند.

- آلیاژهای کمیاب خاکی-آهن-بور (Nd-Fe-B) بر پایه $Nd_2Fe_{14}B$ که در دهه ۱۹۸۰ معرفی گردیدند.
در سال ۱۹۸۳ کمپانی Sumitomo Special Metals [۳] آهنرباهای دائمی کمیاب خاکی آهن را بر پایه فاز $Nd_2Fe_{14}B$ معرفی کرد و بطور همزمان در سال ۱۹۸۴ در ژاپن و آمریکا به ترتیب توسط Sagawa و Croat جزئیات بیشتری در مورد فرآیند ساخت و خواص آنها بیان گردید [۲ و ۴].

آهنرباهای Nd-Fe-B بخاطر داشتن خواص مغناطیسی عالی به سرعت پیشرفت کرده و سهم زیادی از بازار جهانی آهنرباهای دائمی را به خود اختصاص دادند. این آهنرباها از پیشرفته‌ترین و قوی‌ترین آهنرباهای موجود در جهان می‌باشند که با داشتن نیروی پسماندزدا H_C بالا، اندوکسیون پسماند (B_r) بالا و بالاترین انرژی ماکزیمم مغناطیسی $(BH)_{max}$ به سرعت جایگزین آهنرباهای دائمی دیگر شدند. ساختار کریستالی فاز اصلی این آهنربا $Nd_2Fe_{14}B$ دارای تقارن تتراگونال با گروه فضایی $P4_2/mnm$ و دارای انرژی آنیزوتروپی مغناطو کریستالی تک محوره *Uniaxial Magnetocrystallin Anisotropy* بزرگی می‌باشد. در این ساختار ۶ موقعیت مختلف برای اتمهای آهن، دو موقعیت مجزا برای اتمهای نئودیم و یک موقعیت برای اتم B وجود دارد [۴].

در عمل ریزساختار آهنرباهای Nd-Fe-B متشکل از فازهای زیر می‌باشد [۵]:

- ترکیب بین فلزی سخت مغناطیس $Nd_2Fe_{14}B$ مشهور به فاز Φ .
- فاز غنی از Nd که در دمای اتاق غیر مغناطیس بوده و در دماهای بالاتر از 650 C مایع می‌باشد. این فاز عمل چگالش توسط زیترینگ در حضور فاز مایع را بر عهده دارد و همچنین مسئول عدم کوپلاژ مغناطیسی بین دانه‌ها می‌باشد.

- فاز $Nd_{1.1}Fe_4B_4$ غنی از B ، که در دماهای بالاتر از 13 K غیر مغناطیس بوده و به عنوان آخال غیر مغناطیسی *Nonmagnetic Inclusion* عمل می‌کند.

- فازهای نرم مغناطیس $Fe_2B, \alpha\text{-Fe}$ و Nd_2Fe_{17}
گزارش شده است [۵] که ریزساختار آهنرباهای زینتر شده از نوع $Nd\text{-Fe-B}$ سه فاز $Nd_{1.1}Fe_4B_4, Nd_2Fe_{14}B$ و فاز غنی از Nd را شامل می‌شود.
آلیاژهای $Nd\text{-Fe-B}$ با توجه به مقدار Nd موجود در ترکیب، به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۷ و ۶]:

- ترکیبات با نئودیم کم ($10\text{-}1\text{ at\%Nd}$).
- ترکیبات نزدیک به ترکیب استوکیومتری $Nd_2Fe_{14}B$ ($13\text{-}11\text{ at\%Nd}$).
- ترکیبات با نئودیم بالا ($20\text{-}16\text{ at\%Nd}$ یا 13 at\%Nd).
در ساخت آهنرباهای دائمی $Nd\text{-Fe-B}$ همواره سعی بر این است که ریزساختار آنها شامل بیشترین مقدار فاز اصلی $Nd_2Fe_{14}B$ و کمترین مقدار فازهای ثانویه باشد تا بهترین خواص مغناطیسی را از خود نشان دهد [۷ و ۶].

دو ضعف عمده آهنرباهای $Nd\text{-Fe-B}$ در پائین بودن دمای کوری آنها ($T_c=312\text{ c}$) و مقاومت به خوردگی ضعیف در این نوع آهنرباها می‌باشد که با جایگزینی جزئی عناصر آلیاژساز با Nd و Fe در ترکیب آلیاژی آنها می‌توان این معایب را کاهش داد. همچنین جهت بهبود مقاومت به خوردگی این آهنرباها از پوشش‌های فلزی و غیر فلزی استفاده می‌گردد [۸].

عمدتاً به دلایل زیر عناصر بسیاری به آهنرباهای $Nd\text{-Fe-B}$ اضافه می‌گردد [۳، ۹]:

- بهبود خواص سخت مغناطیسی

- بهبود مقاومت به خوردگی

- افزایش T_c

این افزودنی‌ها به سه دسته ذیل تقسیم بندی می‌شوند [۳، ۹]:

- فلزات ذوب پائین نظیر Cu, Ge می‌باشند.

- فلزات دیرگداز نظیر W, Nb

مرکز اطلاعات مواد علمی ایران
تهران

- عناصری مانند Dy و Co که جایگزین Nd یا Fe در فاز Nd, Fe, B شده و سبب بهبود پارامترهای ذاتی آهنرباهای $Nd-Fe-B$ می‌شوند.

در ساخت آهنرباهای $Nd-Fe-B$ عمدتاً از دو روش متالورژی پودر متداول وانجماد سریع ($Melt\ Spun$) استفاده می‌گردد. به آهنرباهای تهیه شده از روش متالورژی پودر نوعاً آهنرباهای زینتری می‌گویند. کمپانی ژنرال موتورز آهنرباهای تهیه شده از روش $Melt\ Spun$ را مگنو کوئنچ (MQ) نامیده است که به سه نوع با اتصال پلیمری (MQI)، پرس گرم شده ($MQ\ II$) و ($MQIII$) $Die-Upset$ تقسیم می‌شوند [۱].

آهنرباهای $Nd-Fe-B$ از قوی‌ترین آهنرباهای دائمی بوده و موضوع تحقیقات به روز جهان می‌باشند ولی متأسفانه فعالیت‌های تحقیقاتی چندانی در مورد این نوع آهنرباها در ایران صورت نگرفته است. با توجه به جستجوهای انجام شده ملاحظه گردید که تأثیر افزودنی Ge بر خواص آهنرباهای $Nd-Fe-B$ مورد مطالعه زیادی قرار نگرفته است و فقط اطلاعات مختصری در مورد تأثیر افزودنی Ge بر خواص آهنرباهای $Nd-Fe-B$ با اتصال پلیمری منتشر شده است. لذا تصمیم بر آن شد که علاوه بر بررسی تأثیر دمای زیتتر بر خواص مغناطیسی آهنربای $Nd-Fe-B$ زیتتری، در حد امکان تأثیر افزودنی Ge بر ریزساختار و خواص مغناطیسی آن نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

فصل اول: مروری بر منابع مطالعاتی

۱-۱- رفتار فرومغناطیسی مواد [۱۰]:

رفتار فرومغناطیسی در فلزات گروه انتقالی نظیر آهن-کبالت و نیکل ناشی از وجود الکترون‌های منفرد در سطوح انرژی $3d$ است. رفتار مغناطیسی در فلزات کمیاب خاکی نظیر Sm و Eu و Gd ناشی از اوربیتالهای الکترون نیمه پر $4f$ و $5d$ می‌باشد. در Fe و Co و Ni با تأثیر متقابل اوربیتالهای اتمهای مجاور، اسپینهای الکترون‌های خارجی پرنشده $3d$ در امتداد موازی با یکدیگر جهت‌گیری می‌کنند که این جهت‌گیری اسپینهای اوربیتالهای با الکترون منفرد با آرایش خاص فقط در دماهای معینی پایدار هستند. در دماهای بالا به دلیل ارتعاشات حرارتی و برهم‌خوردگی نظم و جهت‌گیری اسپینها، خاصیت مغناطیسی محو می‌شود. درجه حرارتی که در آن رفتار فرومغناطیسی کاملاً ناپدید می‌شود، دمای کوری (T_c) نامیده می‌شود.

در پائینتر از دمای کوری، جهت‌گیری دوقطبیهای مغناطیسی مواد فرومغناطیس، در مناطقی خاص و منظمی به نام حوزه‌های مغناطیسی اتفاق می‌افتد. اگر حوزه‌های مغناطیسی به صورت اتفاقی و نامنظم جهت‌گیری یافته باشند، در این صورت رفتار مغناطیسی در کل نمونه وجود نخواهد داشت. در دماهای بالاتر از دمای کوری ماده پارامغناطیس است.

۱-۱-۱- ساختار حوزه مغناطیسی مواد [۱۰]:

حوزه‌های مغناطیسی، مناطقی از ماده هستند که در آنها تمام دوقطبیها در یک ردیف قرار گرفته اند. در ماده‌ای که قبلاً در معرض میدان مغناطیسی قرار نگرفته است، تک تک حوزه‌ها جهت‌ی نامعین و اتفاقی دارند. بنابراین چنین ماده‌ای در کل، خاصیت مغناطیسی نخواهد داشت. مرزهایی به نام دیوارهای بلوخ (Bloch Wall)، تک تک این حوزه‌های مغناطیسی را از یکدیگر جدا می‌کند. دیوارهای بلوخ یا مرزبین حوزه‌ها، مناطق بسیار باریکی هستند که جهت گشتاور مغناطیسی در آنها به تدریج به طور پیوسته از حوزه‌ای به حوزه دیگر تغییر می‌کند.

۱-۱-۲- حرکت حوزه‌ها در اثر میدان مغناطیسی [۱۰]:

هنگامی که ماده‌ای تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، با ازدیاد میدان، از حجم حوزه‌های ردیف نشده کاسته شده و به حجم حوزه‌های تقریباً ردیف شده افزوده می‌شود. به منظور رشد حوزه‌ها باید مرزهای بین حوزه‌ها حرکت کنند که نیروی لازم برای این حرکت را از میدان مغناطیسی