

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد - الکتروسرامیک

بررسی تهیه پودرهای گارنت یتیریم - آهن با جانشینی گالیم به

کمک فرایند مکانوشیمیایی

توسط

محمدعلی کرمی

اساتید راهنما

دکتر بابک هاشمی

دکتر هومان شکراللهی

بهمن ماه ۱۳۹۰

به نام خدا

## اظہارنامہ

اینجانب محمد علی کرمی به شماره دانشجویی ۸۷۰۵۰۸ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد - گرایش الکتروسرامیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، اظہار می‌نمایم کہ این پایان‌نامہ تماماً حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی کہ از منابع دیگران استفاده کرده‌ام نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظہار می‌کنم کہ تحقیق و موضوع پایان‌نامہ‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم کہ بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامہ مالکیت فکری و معنوی متعلق بہ دانشگاه شیراز می‌باشد.

محمد علی کرمی



به نام خدا

بررسی تهیه پودرهای گارنت بیتریم - آهن با جانشینی گالیم به کمک فرایند  
مکانوشیمیایی

به کوشش

محمد علی کرمی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از  
فعالیت‌های لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی مواد (گرایش الکتروسرامیک)

دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

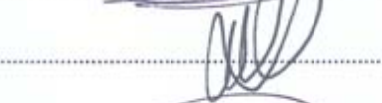
ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی



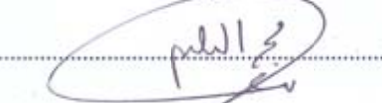
دکتر بابک هاشمی، دانشیار بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)



دکتر هومان شکراللهی، استادیار بخش مهندسی مواد



دکتر کمال جانقربان، استاد بخش مهندسی مواد



دکتر محمد ابراهیم بحرالعلوم، استاد بخش مهندسی مواد

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم...

## سپاس‌گزاری

اکنون که این پایان‌نامه به انجام رسیده، پس از سپاس از خدای بزرگ، بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادرم به خاطر کمک‌های بی‌دریغشان در طول دوران زندگی، تشکر ویژه نمایم. همچنین از اساتید ارجمندی از بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز که در طی دوره کارشناسی ارشد دانسته‌هایشان را به بنده انتقال داده‌اند، تشکر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر هاشمی استاد بخش مهندسی مواد به سبب حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزنده ایشان در انجام این تحقیق تشکر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر شکراللهی استاد بخش مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شیراز به سبب راهنمایی‌های ایشان تشکر می‌نمایم. از اساتید مشاور بزرگوار، آقای دکتر جانقربان و آقای دکتر بحرالعلوم که در انجام هر چه بهتر این تحقیق یاری رساندند کمال تشکر را دارم. از آقای مهندس شجاع انصاری دانشجوی دانشگاه شیراز به سبب کمک‌های ایشان حین انجام این تحقیق تشکر می‌نمایم.

## چکیده

بررسی تهیه پودرهای گارنت یتتریم – آهن با جانشینی گالیم به روش فرایند مکانوشیمیایی

به کوشش:

محمد علی کرمی

در این پژوهش تأثیر فرایند مکانوشیمیایی در سنتز پودر گارنت یتتریم آهن (YIG) از مخلوط پودرهای  $Y_2O_3/\alpha-Fe_2O_3$  و همچنین تأثیر جانشینی گالیم (Ga) و عملیات حرارتی روی خواص مغناطیسی این فریت مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی مورفولوژیکی و ساختاری به ترتیب به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه X (XRD) صورت گرفت. فعالیت حرارتی بوسیله آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) اندازه گیری شد. خواص مغناطیسی به کمک مگنتومتر نمونه مرتعش (VSM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آسیاکاری پرانرژی منجر به تشکیل فاز گارنت نمی شود و حتی دمای تشکیل آن را کاهش نمی دهد. علاوه بر این، مقداری فاز ارتوفریت می تواند در طی فرایند آسیاکاری تشکیل شود. همچنین، جانشینی Ga منجر به کاهش آهنربایی اشباع می شود. با این حال، کوئچ نمونه از دمای  $^{\circ}C$  ۱۲۵۰، از روند کاهش آهنربایی اشباع می کاهد.

## فهرست

۱.....	فصل اول: مقدمه	۱
۲.....	۱-۱. مقدمه	۲
۵.....	فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده	۵
۶.....	۱-۲. تاریخچه علم مغناطیس	۶
۷.....	۲-۲. کمیت‌ها و واحدها در مغناطیس	۷
۱۰.....	۳-۲. منشأ ممان‌های مغناطیسی	۱۰
۱۰.....	۱-۳-۲. حالت‌های اسپینی و اربیتال الکترون‌ها	۱۰
۱۳.....	۲-۳-۲. مدل برداری اتم‌ها	۱۳
۱۶.....	۳-۳-۲. انواع مواد مغناطیسی بر اساس نوع ممان مغناطیسی	۱۶
۱۷.....	۴-۳-۲. توزیع فضایی اربیتال‌های الکترونی	۱۷
۱۷.....	۵-۳-۲. اثر اتم‌های همسایه: اثرهای میدان کریستالی	۱۷
۱۹.....	۴-۲. انواع مواد مغناطیسی	۱۹
۱۹.....	۱-۴-۲. مواد دیامغناطیس	۱۹
۱۹.....	۲-۴-۲. مواد پارامغناطیس	۱۹
۲۱.....	۳-۴-۲. مواد فرومغناطیس	۲۱
۲۳.....	۴-۴-۲. مواد آنتی فرومغناطیس	۲۳
۲۴.....	۵-۴-۲. مواد فری مغناطیس	۲۴
۲۶.....	۵-۲. ناهمسانگردی مغناطیسی	۲۶
۲۶.....	۱-۵-۲. ناهمسانگردی مگنتو کریستالی	۲۶
۲۷.....	۲-۵-۲. ناهمسانگردی شکلی	۲۷
۲۷.....	۳-۵-۲. ناهمسانگردی تنشی (مگنتواستریکشن)	۲۷



۲۸	۶-۲ شکست مغناطیسی و زاویه‌دار شدن اسپین
۲۸	۷-۲ حلقه هیستریزیس
۳۰	۱-۷-۲ مواد نرم مغناطیس
۳۱	۲-۷-۲ مواد سخت مغناطیس
۳۱	۸-۲ تلفات مغناطیسی
۳۳	۹-۲ گارنت
۳۳	۱-۹-۲ ساختار گارنت
۳۶	۲-۹-۲ جانشینی‌های کاتیونی
۳۸	۳-۹-۲ محلول‌های جامد گارنت
۴۱	۴-۹-۲ خواص مغناطیسی گارنت‌ها
۴۶	۱۰-۲ روش سنتز مکانوشیمیایی
۴۷	۱-۱۰-۲ سینتیک واکنش‌های مکانوشیمیایی
۵۰	۲-۱۰-۲ سنتز مکانوشیمیایی فریت‌ها
۵۲	۳. فصل سوم: روش تحقیق و تجهیزات مورد نیاز
۵۳	۱-۳ مواد مورد نیاز
۵۳	۱-۱-۳ مواد اولیه
۵۴	۲-۱-۳ عامل کنترل فرایند (PCA)
۵۴	۲-۳ مراحل ساخت
۵۵	۱-۲-۳ توزین مواد اولیه
۵۶	۲-۲-۳ مخلوط کردن و آسیاکاری
۵۸	۳-۲-۳ پرس
۶۰	۴-۲-۳ عملیات حرارتی
۶۰	۵-۲-۳ کوئچ تعدادی از نمونه‌ها
۶۱	۶-۲-۳ خرد کردن نهایی پودرها برای اندازه‌گیری خواص
۶۱	۳-۳ آزمایش‌های انجام‌شده

۶۱	..... (XRD) X اشعه	۳-۳-۱
۶۲	..... (DTA) افتراقی	۳-۳-۲
۶۳	..... (SEM) روبشی میکروسکوپ الکترونی	۳-۳-۳
۶۵	..... (VSM) مگنتومتر نمونه مرتعش	۳-۳-۴
<b>۴. فصل چهارم: نتایج و بحث</b>		
۶۷	..... آهن - گارنت یتیریم	۴-۱-۱
۶۷	..... (SEM) پودرهای آسیاکاری شده	۴-۱-۱
۷۰	..... (DTA) افتراقی	۴-۱-۲
۷۵	..... پودرهای آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف	۴-۱-۳
۷۸	..... پودرهای عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف	۴-۱-۴
۸۱	..... پودرهای آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف	۴-۱-۵
۸۷	..... پودرهای عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف	۴-۱-۶
۹۲	..... (SEM) روبشی میکروسکوپ الکترونی	۴-۱-۷
۹۳	..... آهن - گارنت $Ga^{3+}$ یتیریم	۴-۲-۱
۹۳	..... پودرهای با درصد های مختلف $Ga^{3+}$	۴-۲-۱
۹۶	..... بررسی خواص مغناطیسی	۴-۲-۲
<b>۵. فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>		
۱۰۱	.....	۵-۱
۱۰۲	..... نتیجه‌گیری	۵-۲
۱۰۳	..... پیشنهادات	۵-۳
۱۰۴	..... مراجع	

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲. کمیت‌های مغناطیسی و واحدهای آنها در سیستم‌های SI و گوسی ..... ۹
- جدول ۲-۲. ثوابت شبکه گارنتهای خاکی نادر ..... ۳۸
- جدول ۳-۲. طول پیوند کاتیون - اکسیژن برای محلول جامدهای  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$  و  $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$  ..... ۴۰
- جدول ۱-۳. برخی مشخصات مواد اولیه ..... ۵۳
- جدول ۲-۳. درصد وزنی اکسیدهای اولیه به ازای x های مختلف ..... ۵۶
- جدول ۱-۴. اندازه دانه‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در زمان‌های مختلف آسیاکاری ..... ۷۶
- جدول ۲-۴. مقادیر  $M_s$  و  $H_c$  و  $\chi_{mi}$  مربوط به زمان‌های آسیاکاری مختلف ..... ۸۳
- جدول ۳-۴. مقادیر  $M_s$  و  $H_c$  و  $\chi_{mi}$  پودر ۴۸ ساعت آسیاکاری شده قبل و پس از عملیات حرارتی در دماهای مختلف ..... ۸۸
- جدول ۴-۴. مقادیر ثابت شبکه برای مقادیر مختلف جانشینی Ga ..... ۹۴
- جدول ۵-۴. مقادیر  $M_s$  و  $H_c$  و  $\chi_{mi}$  پودر  $Y_3Ga_xFe_{5-x}O_{12}$  با x های مختلف تهیه شده به روش متداول و سرعت سرد کردن آرام ..... ۹۶
- جدول ۶-۴. مقادیر  $M_s$  و  $H_c$  و  $\chi_{mi}$  پودر  $Y_3Ga_xFe_{5-x}O_{12}$  با x های مختلف تهیه شده به روش متداول و کوئنچ شده ..... ۹۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. مدل برداری اتم برای حالت  $l = 2$  و میدان خارجی غیر صفر ..... ۱۱
- شکل ۲-۲. تأثیر میدان مغناطیسی بر سطوح انرژی دو حالت الکترونی با  $m_s = +1/2$  و  $m_s = -1/2$  ..... ۱۳
- شکل ۳-۲. برهم‌کنش اسپین - مدار بین اندازه حرکت‌های زاویه‌ای  $\vec{S}$  و  $\vec{L}$  ..... ۱۴
- شکل ۴-۲. تغییرات  $L$ ،  $S$ ،  $J$  و  $g\sqrt{J(J+1)}$  برای لاتانیدها ..... ۱۶
- شکل ۵-۲. تابع توزیع شعاعی (RDF) لایه الکترونی خارجی کبالت و گادولینیم ..... ۱۷
- شکل ۶-۲. رابطه  $\chi$  و  $1/\chi$  با دما برای مواد پارامغناطیس ..... ۲۱
- شکل ۷-۲. رابطه  $\sigma_s$  و  $1/\chi$  با دما برای مواد فرومغناطیس ..... ۲۲
- شکل ۸-۲. منحنی شماتیک بیث - اسلیتر ..... ۲۳
- شکل ۹-۲. رابطه  $\chi$  و  $1/\chi$  با دما برای مواد آنتی فرومغناطیس ..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲. برهم‌کنش ابرتبادلی Mn - O - Mn ..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲. رابطه  $\sigma_s$  و  $1/\chi$  با دما برای مواد فری مغناطیس ..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲. یک حلقه هیستریزس معمولی ..... ۲۹
- شکل ۱۳-۲. آرایش چندوجهی‌ها در ساختار گارنت ..... ۳۳
- شکل ۱۴-۲. موقعیت مکان‌های کاتیونی در ساختار گارنت ..... ۳۴
- شکل ۱۵-۲. موقعیت مکان‌های کاتیونی در سلول اولیه ..... ۳۵
- شکل ۱۶-۲. طول یال‌های چندوجهی‌های اکسیژن در گارنت ..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲. قسمتی از دیاگرام فاز  $Fe_2O_3 - Y_2O_3$  ..... ۳۶
- شکل ۱۸-۲. کسر  $f_i$  برای  $Ga^{3+}$  و  $Al^{3+}$  در محلول جامدهای  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$  و  $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$  ..... ۳۹
- شکل ۱۹-۲. تغییرات ثابت شبکه برای محلول جامد  $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$  ..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲. جهت ممان‌های کاتیون‌های مختلف و آهنربایی کل ناشی از آنها در دماهای قبل و بعد از دمای خنثی ..... ۴۱
- شکل ۲۱-۲. تغییرات ممان مغناطیسی  $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$  با افزایش  $Ga^{3+}$  ..... ۴۲
- شکل ۲۲-۲. تغییرات آهنربایی اشباع  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$  با افزایش  $Al^{3+}$  و تغییر دما ..... ۴۳

- شکل ۲-۲۳. تأثیر افزایش  $In^{3+}$  روی آهنربایش اشباع  $Y_3Fe_{5-x}In_xO_{12}$  ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۴ (a). تغییرات دمایی آهنربایش گارنت‌های حاکی نادر (b) تغییرات دمایی آهنربایش گارنت آهن گادولینیم به صورت ترکیبی از آهنربایش‌های زیرشبکه‌های آهن و گادولینیم ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۵ (a) آرایش پیچ و خم حوزه‌های مغناطیسی در لایه‌های نازک گارنت آهن - یتیریم (b) آرایش حبابی حوزه‌ها (c) طرح شماتیک حباب‌ها به همراه جهات آهنربایش ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۶. تغییر شرایط برای برهم‌کنش شیمیایی بوسیله فعال‌سازی مکانیکی (S سطح ویژه پودر) ..... ۴۸
- شکل ۳-۱. فلوجارت مراحل تولید و آزمایش‌ها برای بررسی فعال‌سازی مکانیکی ..... ۵۴
- شکل ۳-۲. فلوجارت مراحل تولید و آزمایش‌ها برای بررسی اثر افزودنی ..... ۵۵
- شکل ۳-۳. ترازوی دقیق مورد استفاده برای توزین مواد اولیه ..... ۵۶
- شکل ۳-۴. آسیای سیاره‌ای مورد استفاده برای عملیات فعال‌سازی مکانیکی ..... ۵۸
- شکل ۳-۵. دستگاه تست کشش مورد استفاده برای پرس پودر ..... ۵۹
- شکل ۳-۶. اجزای قالب مورد استفاده برای پرس پودر ..... ۵۹
- شکل ۳-۷. منحنی عملیات حرارتی ..... ۶۰
- شکل ۳-۸. دستگاه پراش اشعه X مورد استفاده ..... ۶۲
- شکل ۳-۹. دستگاه آنالیز DTA ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۱. دستگاه ایجاد پوشش طلا به روش اسپاترینگ ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۲. دستگاه VSM ..... ۶۵
- شکل ۴-۱. تصاویر SEM پودرهای آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف ..... ۶۸
- شکل ۴-۲. منحنی اندازه ذرات بر حسب زمان آسیاکاری ..... ۶۸
- شکل ۴-۳. تصاویر SEM پودرهای آسیاکاری شده در زمان‌های ۸، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ ساعت ..... ۶۹
- شکل ۴-۴. منحنی DTA پودر آسیاکاری نشده ..... ۷۱
- شکل ۴-۵. منحنی DTA پودر ۸ ساعت آسیاکاری شده ..... ۷۲
- شکل ۴-۶. منحنی DTA پودر ۲۴ ساعت آسیاکاری شده ..... ۷۲
- شکل ۴-۷. منحنی DTA پودر ۴۸ ساعت آسیاکاری شده ..... ۷۳
- شکل ۴-۸. منحنی DTA پودر ۹۶ ساعت آسیاکاری شده ..... ۷۴
- شکل ۴-۹. طیف XRD مربوط به زمان‌های مختلف آسیاکاری ..... ۷۵

- شکل ۴-۱۰. طیف XRD پودرهای ۴۸ ساعت آسیاکاری شده و عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف ... ۷۹
- شکل ۴-۱۱. طیف XRD پودرهای ۹۶ ساعت آسیاکاری شده و عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف ... ۸۱
- شکل ۴-۱۲. منحنی هیستریزس پودرهای آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۳. تغییرات آهنربایش اشباع با افزایش زمان آسیاکاری ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۴. تغییرات میدان پسماندزدایی با افزایش زمان آسیاکاری ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۵. تغییرات تأثیرپذیری جرمی با افزایش زمان آسیاکاری ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۶. منحنی هیستریزس پودر ۴۸ ساعت آسیاکاری شده پس از عملیات حرارتی در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۷. منحنی هیستریزس مغناطیسی پودر ۴۸ ساعت آسیاکاری شده پس از عملیات حرارتی در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰ و  $1200^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۸. تغییرات آهنربایش پس از عملیات حرارتی در دماهای مختلف ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۹. تغییرات میدان پسماندزدایی پس از عملیات حرارتی در دماهای مختلف ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۰. تغییرات تأثیرپذیری جرمی پس از عملیات حرارتی در دماهای مختلف ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۱. تصاویر SEM پودرهای ۴۸ ساعت آسیاکاری شده پس از عملیات حرارتی در دماهای مختلف . ۹۲
- شکل ۴-۲۲. طیف XRD پودر  $\text{Y}_3\text{Ga}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$  با  $x$  متغیر تهیه شده به روش متداول و سرعت سرد کردن کم ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۳. طیف XRD پودر  $\text{Y}_3\text{Ga}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$  با  $x$  متغیر تهیه شده به روش متداول و کوئنچ شده ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۴. تغییرات ثابت شبکه با افزایش جانشینی Ga ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۵. منحنی هیستریزس پودر  $\text{Y}_3\text{Ga}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$  با  $x$  های مختلف تهیه شده به روش متداول و سرعت سرد کردن آرام ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۶. منحنی هیستریزس پودر  $\text{Y}_3\text{Ga}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$  با  $x$  های مختلف تهیه شده به روش متداول و کوئنچ شده ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۷. تغییرات آهنربایش اشباع با افزایش جانشینی Ga ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۸. تغییرات میدان پسماندزدایی با افزایش جانشینی Ga ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۹. تغییرات تأثیرپذیری جرمی اولیه با افزایش جانشینی Ga ..... ۱۰۰

## فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱. مقدمه

ارزش فریت‌ها طی قرن‌ها برای فرهنگ‌های باستانی شناخته شده است. با این حال بیش از ۸۰ سال از ساخت و بررسی خواص مغناطیسی، ساختاری و الکترونیکی فریت‌های مدرن نمی‌گذرد.

فریت‌ها اکسیدهای مغناطیسی عایق می‌باشند. بر خلاف بیشتر مواد، فریت‌ها هم دارای نفوذپذیری بالا می‌باشند و هم گذردهی مناسبی را در گستره وسیعی از فرکانس دارند. زمانی که یک میدان مغناطیسی متناوب بر یک ماده مغناطیسی هادی اعمال می‌شود در ماده جریانی از الکترون‌ها ایجاد می‌شود که جریان گردابی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. این جریان گردابی باعث افزایش دما و در نتیجه افزایش تلفات می‌شود. به دلیل عایق بودن و در نتیجه پایین بودن تلفات جریان گردابی فریت‌ها، هیچ ماده دیگری با چنین گستره وسیعی از کاربردهای الکترونیک فریت‌ها در تولید، انتقال و تبدیل نیرو وجود ندارد [۱].

همچنین این خواص فریت‌ها را برای کاربردهای میکروویو که در آنها به کوپلینگ قوی با سیگنال‌های الکترومغناطیسی و رفتار غیروارون<sup>۲</sup> نیاز است، منحصر به فرد کرده است. کاربرد

---

<sup>1</sup> eddy current

<sup>2</sup> non-reciprocal behavior



فریت‌ها در ادوات میکروویو به اثر فارادی<sup>۱</sup> مربوط می‌شود که در آن صفحه پلاریزاسیون موج هنگام عبور از ماده تغییر می‌کند. برهم‌کنش موج میکروویو با فریت مشابه رفتار چرخش فارادی در مواد مگنتوآپتیک می‌باشد و فقط فرکانس کاری آنها با همدیگر متفاوت است. فریت‌هایی که برای مدارات رادیویی و ویدئویی ساخته شده‌اند دارای تلفات زیادی در فرکانس‌های میکروویو می‌باشند و برای مدارات میکروویو فریت‌های ویژه با تلفات کم مورد نیاز است.

یک دسته از ادوات مغناطیسی میکروویو مدرن شامل سیرکولاتورها<sup>۲</sup>، ایزولاتورها<sup>۳</sup>، انتقال‌دهنده‌های فاز<sup>۴</sup> و آنتن‌های پچ<sup>۵</sup> می‌باشند که در آنها مجموعه کامل معادلات ماکسول برای توصیف رفتار سیستم مورد نیاز است، چرا که میدان الکترومغناطیسی در حجم فریت به طرز قابل توجهی تغییر می‌کند. در دسته دیگر ادوات که ادوات موج مگنتواستاتیک (MSW) نامیده می‌شوند، طول موج قابل مقایسه با اندازه افزاره می‌باشد. در این حالت، اثرات انتشار<sup>۶</sup> یعنی جمله جریان جابجایی در معادلات ماکسول قابل صرف‌نظر کردن است. دسته سوم ادوات بر اساس اثرات غیرخطی می‌باشند، زمانی که تقریب سیگنال کوچک برای حرکت آهنربایش دیگر قابل استفاده نمی‌باشد [۲].

گارنت‌ها یک دسته مهم از فریت‌ها هستند که خواص میکروویو مناسبی را دارا می‌باشند. گارنت ییتریم - آهن عضو اصلی این خانواده می‌باشد. نظم کاتیونی خاص گارنت، پایداری شیمیایی و ساختاری عالی را به آن داده است. تک کریستال  $Y_3Fe_5O_{12}$  به دلیل عرض خط رزونانس فری‌مغناطیس (FMR) کم آن یکی از مهم‌ترین گارنت‌ها برای کاربردهای میکروویو می‌باشد. رزونانس فری‌مغناطیس یکی از منابع تلفات است که در فرکانس‌های بالا ایجاد می‌شود. هر چه عرض این ناحیه کم‌تر باشد در حقیقت ناحیه فرکانسی که در آن تلفات فری‌مغناطیس رخ می‌دهد کوچک‌تر است.

---

<sup>1</sup> Faraday effect

<sup>2</sup> circulators

<sup>3</sup> isolators

<sup>4</sup> phase shifters

<sup>5</sup> patch antennas

<sup>6</sup> propagation effects

یکی دیگر از کاربردهای فریت‌ها بویژه گارنت‌ها کاربردهای مگنتوآپتیک می‌باشد که در آنها از اثر کر<sup>۱</sup> (چرخش صفحه پلاریزاسیون موج در بازتاب از ماده مغناطیسی) و اثر فارادی (چرخش صفحه پلاریزاسیون در هنگام عبور از ماده مغناطیسی شفاف) استفاده می‌شود. به عنوان مثال یکی از روش‌های ذخیره‌سازی اطلاعات ذخیره‌سازی مگنتوآپتیک می‌باشد که از اثر کر استفاده می‌کند. برای استفاده از خواص مگنتوآپتیک گارنت در ذخیره اطلاعات باید آن را روی زیرلایه به صورت اپیتکسیال رشد داد. برای رسیدن به شرایط بهینه می‌توان از جانشینی یتتریم توسط خاک‌های نادر و جانشینی آهن توسط Al و Ga استفاده کرد. یکی از پارامترهایی که در کاربردهای مگنتوآپتیک مهم می‌باشد میزان چرخش فارادی به ازای مسافت طی شده توسط موج است. در این مورد گارنت یتتریم با جانشینی Bi بیشترین بازده را دارد [۳].

هدف از این تحقیق، بررسی اثر فرایندهای مکانوشیمیایی در ساخت فریت‌های YIG با جانشینی Ga و همچنین بررسی خواص مغناطیسی این فریت‌ها می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Kerr effect

## فصل دوم

## مروری بر تحقیقات انجام شده

### ۱-۲. تاریخچه علم مغناطیس

مغناطیس یکی از قدیمی‌ترین پدیده‌های شناخته شده در تاریخ علوم طبیعی می‌باشد. گفته می‌شود که این پدیده اولین بار توسط یک چوپان که متوجه جذب سر آهنی عصایش توسط سنگی شده بود، کشف شد. این سنگ در محدوده ماگنیزیا (در ترکیه امروزی) پیدا شده بود که نام مغناطیس از آن مشتق شده است. بعدها متوجه شدند که اگر این آهنربای طبیعی با دقت بر روی یک چوب‌پنبه روی سطح آب شناور شود، در جهت ستاره شمالی قرار می‌گیرد. بنابراین، این سنگ به لوداستون<sup>۱</sup> به معنی سنگ هادی مشهور شد.

پیشرفت‌ها در مغناطیس بعد از آن صورت گرفت که اورستد در سال ۱۸۲۰ کشف کرد که میدان مغناطیسی می‌تواند توسط یک جریان الکتریکی تولید شود. اگرچه بسیاری از دانشمندان مشهور (گاوس، ماکسول و فارادی) پدیده مغناطیس را از لحاظ تئوری تبیین کردند، اعتبار ارائه توصیف صحیحی از مواد مغناطیسی عمدتاً به فیزیکدانان قرن بیستم اختصاص دارد.

مواد مغناطیسی هم‌اکنون به عنوان جزء لاینفک تکنولوژی نوین شناخته می‌شوند. این مواد اجزاء بسیاری از وسایل الکترومکانیکی و الکترونیکی را تشکیل می‌دهند [۴].

---

<sup>1</sup> lodestone or loadstone