

دانشگاه کاشان

پژوهشکده علوم و فناوری نانو

پایان نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

(نانو فیزیک)

عنوان:

بررسی شکل گیری و توزیع نانو بلورک های سطحی بر افزایش

اثر امیدانس مغناطیسی بزرگ در مواد آلیاژ آمورف

استاد راهنما:

دکتر مهرداد مرادی

استاد مشاور:

دکتر سید احسان روزمه

توسط:

مهسا خضری

خرداد ۱۳۹۲

تقدیم بہ:

پدرم بہ استواری کوہ

مادرم بہ زلالی چشمہ

ہمسرم بہ صمیمیت باران

تقدیر و تشکر

سایش خدا را سزااست که، هستی مان بخشید، به طریق علم و دانش ره‌نمونان شد، به همیشگی
رهروان علم و دانش مستخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزمان ساخت. پس از
سایش پروردگار، پاس فراوان از آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان
خریدند و خود را سپر برای مشکلات و ناملایمات کردند تا به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم و
تشکر صمیمانه از همسرم که در این راه مرا همراهی نمود.

بر خود لازم می‌دانم که از استاد گرانقدر دکتر مهداد مرادی که با حمایت‌ها و راهنمایی‌های همه‌جانبه خود
امکان تحقیق و مطالعه را برای اینجانب فراهم نمود تشکر کنم. همچنین از استاد گرامی دکتر سید احسان
روزبه باره‌نمایی‌های ارزنده‌ی‌شان، پاسگزاری می‌کنم.

از اساتید محترم داور دکتر عبدالعلی رضوانی و دکتر ابراهیم حیدری، اساتید گرامی دکتر ناظری،
دکتر سپهر، همچنین آقایان حاجی علی، محمودی، مهربویی و دیگر دوستان آزمایشگاه مکتوباتیک تشکر
کرده و از خداوند مهربان موفقیت و شادی برای تک‌تک آنها خواستارم.

چکیده

اثر امپدانس مغناطیسی به صورت تغییرات امپدانس یک رسانای مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی تعریف می‌شود. مطالعه و بررسی این اثر از سال ۱۹۹۴ پس از گزارش موهری و همکارانش مبنی بر وجود اثر امپدانس مغناطیسی در سیم کبالت پایه، به طور جدی آغاز شد. اثر امپدانس مغناطیسی در مواد مختلفی مشاهده شده است اما در این میان مواد نانوساختار به علت خواص غیر معمول مغناطیسی، الکتریکی و اپتیکی و همچنین تنوع در روش‌های فرآوری آنها، همواره مورد توجه بوده‌اند. همچنین آلیاژهای آمورف به علت ساختار شیمیایی و روش ساخت مخصوص به خود گزینه مناسبی برای نانوبلورین شدن هستند و به علت وابستگی اثر امپدانس مغناطیسی به عمق نفوذ جریان در سطح، فرایند نانوبلورک‌های سطحی بر روی نمونه‌های بازپخت شده اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند.

افزایش اثر امپدانس مغناطیسی بخاطر کاربردی‌تر شدن آن همواره مورد توجه محققان بوده است. یکی از روش‌های متداول برای افزایش این اثر استفاده از بازپخت‌های گرمایی مختلف و کاهش تنش‌های هنگام ساخت نمونه است. ذکر این نکته حایز اهمیت است که این مواد به شرط آمورف بودن دارای اثر امپدانس مغناطیسی بزرگی هستند اما تحقیقات نشان داده است که برای این مواد در مرز ورود به دنیای بلوری شدن و تشکیل نانو بلورک بر سطح آنها با اندازه دانه در حد چند ده نانومتر اثر امپدانس مغناطیسی قابل توجهی مشاهده می‌شود.

در این پایان‌نامه نوارهای آلیاژ آمورف کبالت پایه $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ با انجام انواع بازپخت‌ها از قبیل، بازپخت جریانی در حضور هوا، تحت خلأ و در حضور گاز بی اثر آرگون، بازپخت جریانی - میدانی در حضور هوا و گاز آرگون، بازپخت ماکروویو و بازپخت گرمایی (کوره‌ای) مورد بررسی قرار گرفته شده است. بیشینه درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ برای بازپخت جریانی در حضور هوا، تحت خلأ و در حضور گاز بی اثر آرگون هر یک به ترتیب ۱۲۵، ۱۵۸/۳۳ و ۱۵۰ درصد می‌باشد. بیشینه درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ برای بازپخت جریانی - میدانی در حضور هوا و در حضور گاز آرگون هر یک به ترتیب ۱۷۸ و ۱۳۹ درصد بدست آمده است. همچنین در بازپخت گرمایی این مقدار ۱۲۵ درصد محاسبه

شده و برای بازپخت ماکروویو ۹۵ درصد که این مقدار کمترین میزان حاصل شده می‌باشد. در بررسی این نتایج دیده می‌شود بازپخت جریانی - میدانی در حضور هوا بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. همچنین با محاسبه اندازه متوسط دانه‌ها و بررسی این نتایج با گزارشات علمی که اندازه‌ی این دانه‌ها را بین ۱۰ تا ۲۵ نانومتر گزارش کرده بود از ایجاد نانوبلورک‌های روی سطح اطمینان حاصل شد.

کلمات کلیدی: اثر امپدانس مغناطیسی، آلیاژهای آمورف، بازپخت، نانوبلورک‌های سطحی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول: جنبه های اصلی GMI.....
۲	۱-۱ اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ (GMI).....
۴	۲-۱ تشریح مدل های نظریه.....
۵	۱-۲-۱ مدل های شبه ایستا.....
۵	۲-۲-۱ مدل های تشریح کننده امپدانس مغناطیسی بزرگ در فرکانس های بالا.....
۶	۳-۱ عوامل تاثیر گذار بر امپدانس مغناطیسی بزرگ.....
۶	۱-۳-۱ جریان متناوب عبوری از نمونه.....
۷	۲-۳-۱ میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه.....
۸	۳-۳-۱ فرکانس اندازه گیری.....
۹	۴-۳-۱ دمای اندازه گیری.....
۱۰	۴-۱ تاثیر پارامترهای اندازه گیری بر امپدانس مغناطیسی.....
۱۰	۱-۴-۱ اثر ساختاری نمونه بر GMI.....
۱۳	۲-۴-۱ اثر باز پخت بر GMI.....
۱۵	۵-۱ وامغناطیدگی و اثر نامتقارنی در GMI.....
۱۵	۱-۵-۱ وامغناطیدگی در GMI.....
۱۶	۲-۵-۱ اثر نامتقارنی بر GMI.....

عنوان

صفحه

- ۶-۱ مشخصات مواد برای کاربردهای مبتنی بر امپدانس مغناطیسی ۱۷
- ۱-۶-۱ اثر امپدانس مغناطیسی در سیم های مغناطیسی ۱۸
- ۲-۶-۱ اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ در نوارها و فیلم های نازک ۱۹
- ۷-۱ حسگرهایی بر پایه اثر امپدانس مغناطیسی و کاربردهای آنها ۲۰
- الف (حسگر میدان مغناطیسی ۲۰
- ب (حسگر جریان ۲۰
- ج (حسگر فشار ۲۱
- ۸-۱ کاربرد حسگرهای GMI ۲۲
- ۲- فصل دوم : چیدمان های بخش تجربی ۲۳
- ۱-۲ ساخت نوار مغناطیسی ۲۴
- ۲-۲ تشریح نمونه ۲۵
- ۳-۲ پایه نگهدارنده نمونه ۲۷
- ۴-۲ اندازه گیری امپدانس مغناطیسی ۲۹
- ۵-۲ معرفی و تنظیم وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز برای بازپخت ها ۳۲
- ۳- فصل سوم: نتایج تجربی ۳۸
- ۱-۳ خواص فیزیکی نمونه خام کبالت پایه ۴۰
- نقش پراش پرتو ایکس ۴۰

عنوان

صفحه

- ۲-۳ بازیخت ۴۱
- ۳-۲-۱ بازیخت جریانی و اثر آن بر امپدانس مغناطیسی ۴۱
- ب) بازیخت جریانی تحت خلأ: ۴۶
- ۳-۲-۲ بازیخت جریانی - میدان مغناطیسی و اثر آن بر امپدانس مغناطیسی ۵۱
- ۳-۲-۳ بازیخت گرمایی (کوره‌ای) و تاثیر آن بر امپدانس مغناطیسی ۵۴
- ۴-۲-۳ بازیخت ماکروویو ۵۸
- نتیجه گیری و پیشنهادات ۵۹
- مراجع ۶۱

فهرست شکل ها :

- شکل ۱-۱: وابستگی اثر عمق پوسته و تراوایی برگشت پذیر به میدان مغناطیسی خارجی dc. ۳
- شکل ۲-۱: طرح شماتیک از وابستگی عمق پوسته نسبت به میدان مغناطیسی dc خارجی برای دو نمونه سیم و نوار. ۴
- شکل ۳-۱: تغییر رفتار دو قله‌ای به تک قله‌ای اثر GMI در سیم کبالت پایه با افزایش جریان [۲۱] ۷
- شکل ۴-۱: وابستگی $\Delta Z/Z$ به میدان مغناطیسی dc در فرکانس‌های متفاوت. شکل داخلی وابستگی فرکانسی $[\Delta Z/Z]_{max}$ را نشان می‌دهد. ۸
- شکل ۵-۱: وابستگی دمایی GMI یک آلیاژ کبالت پایه بازپخت شده در فرکانس ۱ MHz ... ۹
- شکل ۶-۱: منحنی GMI میکروسیم با طول‌های متفاوت ($l=1,2,4$ mm) در فرکانس ۱۰ MHz. ۱۰
- شکل ۷-۱: وابستگی بیشینه مقدار GMI در سیم Co-Fe-Si-B به قطر سیم. ۱۱
- شکل ۸-۱: وابستگی بیشینه امپدانس مغناطیسی و زبری سطح در نوارهای آهن پایه نانو بلوری به تزریق Cr در فرکانس ۲ مگاهرتز. ۱۲
- شکل ۹-۱: وابستگی میدان مغناطیسی در اثر GMI. ۱۵
- شکل ۱۰-۱: (a) نمای شماتیک از حسگر جریان DC بر پایه‌ی اندازه‌گیری میدان ناشی از جریان (b) تقریب خطی می‌تواند به طور مناسبی اصلاح شود (در این مورد تا ۱۲ آمپر). ۲۱
- شکل ۱۱-۱: حسگر مگنتوالاستیک بر پایه وابستگی اثر GMI به تنش با المان حسگری میکروسیم کبالت پایه با روکش شیشه. ۲۱
- شکل ۲۱-۲: نمایی از دستگاه تولید نوارهای مغناطیسی آلیاژ آمورف به روش ذوب چرخان ۲۵
- شکل ۲-۲: طیف XRD از نمونه‌ها، نوار با پهنای $4/93$ میلی‌متر (شکل بالا). نوار با پهنای $0/89$ میلی‌متر (شکل پایین). ۲۶
- شکل ۳-۲: نمونه‌ای از نوارهای مغناطیسی. ۲۶
- شکل ۴-۲: نگهدارنده نمونه برای اعمال پخت جریان. ۲۷
- شکل ۵-۲: نگهدارنده نمونه، برای اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی. ۲۸

- شکل ۶-۲: مدار داخلی پایه اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی ۲۹
- شکل ۷-۲: دستگاه منبع تغذیه متناوب ۳۱
- شکل ۸-۲: دستگاه اسیلوسکوپ ۳۱
- شکل ۹-۲: دستگاه منبع تغذیه ۳۱
- شکل ۱۰-۲: چیدمان وسایل آزمایشگاهی (بالا) و مدار (پایین) اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی ۳۲
- شکل ۱۱-۲: سیملوله برای تولید میدان مغناطیسی، سیملوله کوچک (سمت راست) سیملوله بزرگ (سمت چپ) ۳۳
- شکل ۱۲-۲: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت جریان‌ی نمونه‌ها در هوا (سمت راست) بازپخت جریان‌ی - میدانی نمونه‌ها در هوا (سمت چپ) ۳۴
- شکل ۱۳-۲: نمائی از محفظه خلأ ۳۵
- شکل ۱۴-۲: چیدمان بازپخت جریان‌ی در محفظه خلأ ۳۵
- شکل ۱۵-۲: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت جریان‌ی - میدانی نمونه‌ها در محفظه خلأ ۳۶
- شکل ۱۶-۲: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت جریان‌ی نمونه‌ها در حضور گاز آرگون در محفظه خلأ ۳۶
- شکل ۱۷-۲: چیدمان وسایل آزمایش برای بازپخت نمونه‌ها در کوره در محیط خلأ ۳۷
- شکل ۱۸-۲: دستگاه ماکروویو ۳۷
- شکل ۱-۳: نقش پراش پرتو X نمونه با پهنا $0/8$ میلیمتر (نمونه باریک) ۴۰
- شکل ۲-۳: نقش پراش پرتو X نمونه با پهنا ۵ میلیمتر (نمونه ضخیم) ۴۱
- شکل ۳-۳: نسبت امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی برای بازپخت جریان‌ی در حضور هوا در جریان‌های مختلف ۴۳
- شکل ۴-۳: نقش پراش پرتو ایکس، از پایین به بالا: نمونه خام، بازپخت در جریان ۳۰۰ میلی‌آمپر، بازپخت در جریان ۶۰۰ میلی‌آمپر، بازپخت ۸۰۰ میلی‌آمپر ۴۴
- شکل ۵-۳: نسبت درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ برای نمونه‌های خام و بازپخت شده ۵

جریانی تحت خلأ.....	۴۷
شکل ۳-۶: بیشینه درصد امیدانس مغناطیسی بر حسب جریان‌های بازپخت برای بازپخت در شرایط فشار اتمسفر و 2×10^{-2} میلی بار.....	۴۸
شکل ۳-۷: نسبت امیدانس مغناطیسی برای بازپخت در خلأ گاز آرگون برای جریان‌های مختلف.....	۴۹
شکل ۳-۸: نسبت امیدانس مغناطیسی بزرگ بر حسب زمان‌های بازپخت مختلف برای نمونه‌ها در بازپخت جریانی در حضور گاز آرگون.....	۵۰
شکل ۳-۹: نسبت امیدانس مغناطیسی بزرگ برای میدان‌های مختلف در بازپخت جریانی - میدانی.....	۵۲
شکل ۳-۱۰: نسبت امیدانس مغناطیسی بزرگ در پخت جریانی - میدانی در خلأ در فرکانس‌های ۱۰، ۴، ۱ مگاهرتز و ۵۰۰ کیلوهرتز در میدان (الف) ۰/۵ اورستد (ب) ۳ اورستد (ج) ۱۰ اورستد.....	۵۴
شکل ۳-۱۱: نسبت امیدانس مغناطیسی برای نمونه‌های باریک خام و بازپخت شده در رنج دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰.....	۵۶
شکل ۳-۱۲: نسبت امیدانس مغناطیسی برای نمونه‌های ضخیم خام و بازپخت شده در رنج دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد.....	۵۶
شکل ۳-۱۳: نسبت امیدانس مغناطیسی بر حسب زمان بازپخت برای نمونه‌ها در پخت ماکروویو.....	۵۸
شکل ۳-۱۴: مقایسه درصد امیدانس مغناطیسی بزرگ برای تمامی بازپخت‌های مختلف انجام شده.....	۵۹
جدول ۳-۱: متوسط اندازه دانه‌ها برای نقش پراش پرتوایکس نمونه‌های بازپخت جریانی.....	۴۵

پیشگفتار

مطالعات بنیادی که روی مواد مغناطیسی توسط هایزنبرگ^۱ و لاندائو^۲ انجام شد را می‌توان به عنوان اولین نظریه اثرات امپدانس مغناطیسی بزرگ و مقاومت مغناطیسی بزرگ دانست. مقاومت مغناطیسی بزرگ، تغییر مقاومت نمونه تحت اثر یک میدان مغناطیسی است که بررسی آن نیازمند دانستن مفاهیم کوانتومی بر پایه اسپین حاملها و برهم کنش آنها با مغناطش ناشی از مواد مغناطیسی است، در مقابل اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ یک پدیده کلاسیکی است که می‌تواند بر پایه‌ای از اصول و مفاهیم الکترومغناطیسی بیان شود. امپدانس مغناطیسی (MI) شامل تغییرات امپدانس الکتریکی یک رسانای مغناطیسی می‌باشد که ضمن عبور جریان الکتریکی متناوب، تحت اثر یک میدان مغناطیسی خارجی ایستا قرار می‌گیرد. امروزه ثابت شده است که مقاومت مغناطیسی در پدیده امپدانس مغناطیسی بزرگ سهم کمی دارد و این پدیده را نمی‌توان با GMR توجیه کرد. هریسون^۳ اولین گزارش در مورد امپدانس مغناطیسی که توجیه آن بر پایه اثر پوسته بود را ارائه کرد. اما با توجه به ضعیف بودن اثر امپدانس مغناطیسی در مطالعات اولیه وی، این اثر از اهمیت چندانی برخوردار نبود. در نهایت با مشاهده اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ در سیم کبالت پایه توسط پانینا^۴ و موهری^۵ در سال ۱۹۹۴ توجهات بسیاری به این پدیده معطوف شد و تحقیقات و مطالعات در رابطه با GMI گسترش پیدا کرد. با توسعه حسگرهای GMI، به علت مزیت‌های فراوان آن، در همان مراحل اولیه، کاربردهای وسیعی برای آن در زندگی بشر پیش‌بینی شد. مهمترین مزیت حسگرهای مغناطیسی که بر پایه GMI ساخته می‌شوند، حساسیت بسیار بالای آن است. برای مثال حساسیت حسگرهای GMR حدود ۱ درصد بر اورستد است در حالی که حساسیت حسگرهای GMI به ۵۰۰ درصد بر اورستد و بیشتر از آن نیز می‌رسد. با کاربردی شدن این اثر تحقیقات و مطالعات و بررسی‌های تجربی روی آن بیشتر شد و مشخص شد که این اثر به پارامترهای گوناگونی نظیر ابعاد نمونه،

¹ Heisenberg

² Landau

³ Harrison

⁴ Pannina

⁵ Mohhri

دامنه و فرکانس جریان عبوری از نمونه، خواص و ساختارهای فیزیکی، مغناطیسی و شیمیایی نمونه بستگی دارد. این تحقیقات نشان دادند که مواد فرومغناطیس در فاز آمورف به علت داشتن ساختار نامنظم دارای خواص مغناطیسی مناسبی برای نشان دادن اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ هستند. در فلزات فرومغناطیس واقعی، بیشینه مقدار GMI به طور تجربی بسیار کمتر از پیش‌بینی‌های نظریه بود. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ساخت و فرآوری نمونه‌های GMI به منظور توسعه اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ متمرکز شد. از جمله نمونه‌های ساخته شده برای کاربردهای GMI می‌توان سیم‌های مغناطیسی، نوارهای مغناطیسی، فیلم‌های آمورف، چند لایه‌های مغناطیسی و میکروسیم‌ها اشاره کرد.

۱- فصل اول: جنبه های اصلی GMI

۱-۱ اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ (GMI)

پدیده‌ای که اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ^۱ نامگذاری شد، به طور همزمان و موازی در زمینه پدیده‌های ترابرد مغناطیسی جدید در حال شکل گرفتن بود. با رشد سریع تیم‌های تحقیقاتی که در تمامی دنیا به مطالعه امپدانس مغناطیسی بزرگ و کاربردهای تکنولوژیکی آن می‌پرداختند، این پدیده به طور واقعی، یک شاخه از تحقیقات را که تلفیقی از میکرومغناطیس مگنت‌های نرم با الکترودینامیک کلاسیک بود، گشود.

امپدانس مغناطیسی شامل تغییر امپدانس الکتریکی کل یک رسانای مغناطیسی (معمولاً رسانای فرومغناطیس) تحت اعمال یک میدان یکنواخت خارجی H_{dc} است، وقتی یک جریان متناوب، $I = I_0 e^{i\omega t}$ با اندازه I_0 و فرکانس $(\omega = 2\pi f)$ و فرکانس معمول f از نمونه عبور می‌کند. این جریان طبق قانون آمپر یک میدان مغناطیسی القایی عرضی تولید می‌کند. بنابراین امپدانس مغناطیسی مختلط نمونه خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(\omega) = U_{ac}/I_{ac} = R + iX \quad (1-1)$$

که در آن I_{ac} جریان متناوب است که با فرکانس ω در نمونه حرکت می‌کند و U_{ac} ولتاژ متناوب با همان فرکانس است که از دو سر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی خارجی باعث تغییر امپدانس $Z = R + iX$ در مواد نرم مغناطیسی می‌شود. در رابطه، R مقاومت^۱ و X رئاکتانس^۲ نمونه است.

وقتی تغییرات امپدانس با میدان خارجی زیاد باشد، این پدیده به عنوان امپدانس مغناطیسی بزرگ^۳ (GMI) شناخته می‌شود و در حالت کلی نسبت این تغییرات بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$GMI(\%) = \frac{\Delta Z}{Z} (\%) = \left\{ \frac{|Z(H)| - |Z(H_{max})|}{|Z(H_{max})|} \right\} \times 100 \quad (2-1)$$

که در آن، $|Z|$ اندازه امپدانس $(|Z| = R^2 + X^2)$ و H_{max} مقدار بیشینه میدان خارجی اعمال شده

¹ Resistance

² Reactance

³ Giant Magneto Impedance

به نمونه است. باید توجه کنیم که تعریف (۱-۱) به طور کامل برای رساناهای فرومغناطیس کاربردی نیست زیرا این نوع مواد معمولاً خطی نیستند. به عبارت دیگر U_{ac} به طور معمول متناسب با I_{ac} و تابع هارمونیک از زمان نمی‌باشد. در شرایط خاص رسانای فرومغناطیسی را می‌توان به عنوان نمونه خطی در نظر گرفت و در روند محاسبه امپدانس مختلط، از تقریب خطی استفاده کرد.

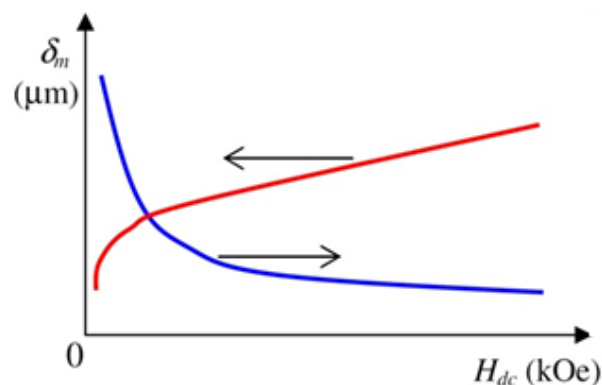
اگرچه رابطه $\Delta Z/Z$ به عنوان تعریف امپدانس مغناطیسی بزرگ، ممکن است برای مشخص کردن تغییرات GMI مفید باشد، اما برای فیزیک‌دانان چندان مفید نخواهد بود. حتی اگر وابستگی خطی به GMI وجود داشته باشد و بتوان آنرا به طور ساده محاسبه کرد، باز هم چندین دلیل برای تعیین تعریف دیگری وجود دارد:

۱- اطلاعات جابجای فاز از بین می‌رود.

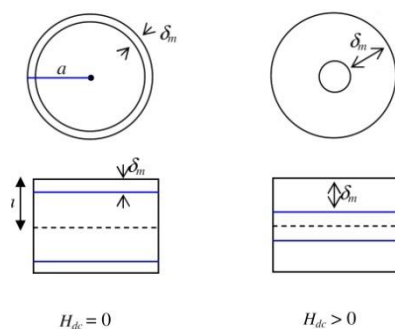
۲- امپدانس فاز به طور مبهمی به H_{max} بستگی دارد (اگر نمونه به طور ظاهری اشباع مغناطیسی باشد، به این معنی نیست که امپدانس مغناطیسی هم اشباع شده است).

۳- نسبت $\Delta Z/Z$ به اینکه چه مقدار از جریان در $Z(H_{max})$ وارد می‌شود، نسبتاً حساس است. از این دیدگاه، تعریف نسبت Z/R_{dc} به عنوان نسبت GMI شاید مناسب‌تر باشد.

برای بدست آوردن مقدار قابل توجه GMI باید عمق نفوذ در نمونه کم باشد به عبارتی نمونه باید دارای اثر پوسته بزرگی باشد. به این منظور موادی با نفوذپذیری مغناطیسی بالا و R_{dc} کوچک انتخاب می‌کنیم.



شکل ۱-۱: وابستگی اثر عمق پوسته و تراوایی برگشت پذیر به میدان مغناطیسی خارجی dc.



شکل ۲-۱: طرح شماتیک از وابستگی عمق پوسته نسبت به میدان مغناطیسی dc خارجی برای دو نمونه سیم و نوار.

در واقع گذردهی مغناطیسی بیانگر رفتار ماده نسبت به میدان مغناطیسی اعمالی است و مقاومت مشخصه، مقاومت رسانا با طول و سطح مقطع واحد در مقابل عبور جریان می‌باشد که البته عکس رسانندگی یک رسانا نیز هست.

اعمال میدان مغناطیسی ایستای خارجی، سبب بروز تغییرات جدی در مقدار مؤثر گذردهی مغناطیسی شده که نهایتاً باعث اصلاح مقدار عمق پوسته می‌گردد. واضح است که نفوذپذیری بالا باعث کاهش عمق نفوذ شده که در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی و کاهش نفوذپذیری عرضی، عمق پوسته افزایش می‌یابد. تغییرات در عمق پوسته اثر مستقیم بر روی امپدانس رسانا دارد.

تأکید می‌کنیم که مقدار امپدانس مغناطیسی تنها به فرکانس ω و خاصیت μ و ρ وابسته نیست، بلکه به ابعاد نمونه نیز بستگی دارد. بنابراین مقدار امپدانس مغناطیسی بیشتر می‌تواند از مواد مشابه با طولی کوتاهتر نیز بدست آید. δ یا عمق پوسته نمی‌تواند کمتر از یک حد نظری باشد. حدی که برای فلزات مغناطیسی نرم می‌باشد حدوداً 10^{-7} متر است. نمونه‌های امپدانس مغناطیسی با حدود ابعاد چند میکرون اصولاً نمی‌توانند با این تئوری سازگار باشند.

۲-۱ تشریح مدل‌های نظریه‌ای

با توجه به هندسه نمونه (نوار مغناطیسی، فیلم نازک، سیم غیر مغناطیسی با یک لایه روکش مغناطیسی روی سطح آن و ...)، مدل ساختار حوزه‌ها، روش‌های محاسبات عددی و ...

دسته‌بندیهای مختلفی برای ارائه مدل‌های متناسب با سه دسته فرکانس مهم در امپدانس مغناطیسی بزرگ ارائه شده است. در اینجا نظریه‌ها و مدل‌ها را در سه دسته کلی، رده‌بندی می‌کنیم:

۱-۲-۱ مدل‌های شبه ایستا

اگر فرکانس جریان متناوب گذرا از رسانا به اندازه‌ای کم باشد که بتوان سیستم را در حالت تعادل فرض کرد، مدل شبه ایستا قابل استفاده خواهد بود. در این مدلها رابطه عمق پوسته $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$ به صورت $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_4}}$ اصلاح می‌شود که μ_4 گذردهی مغناطیسی عرضی است. وقتی $\frac{\partial \bar{m}}{\partial t} = 0$ باشد، می‌توان μ_4 را بدست آورد. در واقع در این مدل فرض می‌کنیم که مغناطش با زمان تغییر نکند. این فرض که سیستم تقریباً در حالت ایستا است، معادل کمینه کردن انرژی آزاد سیستم می‌باشد. چون حرکت دیواره حوزه‌ها در فرومغناطیس‌های فلزی به شدت ضعیف است، مدل‌های شبه ایستا فقط برای فرکانس‌های بسیار کم که امپدانس مغناطیسی بسیار کوچک است قابل استفاده می‌باشد که این حالت برای کاربردهای واقعی، چندان جالب نیست.

۲-۲-۱ مدل‌های تشریح کننده امپدانس مغناطیسی بزرگ در فرکانس‌های بالا

در فرکانس‌های بالا که فقط فرآیند چرخش ممان‌های مغناطیسی اتفاق می‌افتد، روش شناخته شده از تئوری تشدید فرومغناطیسی برای حل همزمان معادلات ماکسول و لاندائو مناسب است [۱]. تئوری تشدید فرومغناطیسی استاندارد را می‌توان برای GMI در تقریب سیگنال ضعیف به کار برد. اثر ژیرومغناطیسی^۱ و واهلش فرومغناطیسی^۲ که در مدل‌های شبه ایستا نادیده گرفته می‌شوند، در فرکانس‌های بالا کاملاً با اهمیت هستند.

واهلش فرومغناطیس، سبب ضعیف شدن دوران ممانهای مغناطیسی شده و حداقل عمق

¹ Gyro Magnetic Effect

² Ferromagnetic Relaxation

پیوسته‌ی ممکن را برای فلزات مشخص می‌کند. اثر ژیرومغناطیسی هم مربوط به ممان اینرسی مرتبط با مغناطش می‌باشد.

برای یک ماده پیوسته در حال دوران، ممان اینرسی به صورت $I = \int r^2 dm$ و اندازه حرکت زاویه‌ای به صورت $\bar{L} = I\bar{\omega}$ تعریف می‌شوند. I می‌تواند اسکالر یا تانسور باشد و $\bar{\tau} = \frac{d}{dt}\bar{L}$ گشتاور مکانیکی می‌باشد. اثر ژیرومغناطیسی، سبب جابجا شدن بیشینه گذردهی مغناطیسی به سمت میدان‌های خارجی بزرگتر می‌شود (تشدید فرومغناطیس).

۳-۱ عوامل تاثیر گذار بر امپدانس مغناطیسی بزرگ

۱-۳-۱ جریان متناوب عبوری از نمونه

میدان مغناطیسی دایروی ناشی از جریان متناوب که از نمونه عبور می‌کند باعث قرارگیری مغناطش در جهت دایروی (عرضی) می‌شود. تغییرات امپدانس مستقیماً به روند این مغناطیدگی بستگی دارد [۲-۵]. بزرگتر شدن دامنه جریان ac، باعث بزرگ شدن امپدانس (Z) می‌شود. از دیدگاه نظری برای سیم‌ها با رفتار دو قله‌ای GMI، با افزایش دامنه جریان متناوب، کاهش میدان مغناطیسی (H_m) که در آن اندازه امپدانس (Z) به بیشینه می‌رسد، پیش‌بینی شده است. مطابق با شکل (۱-۳)، در جریان‌های خیلی پایین رفتار دو قله‌ای در منحنی GMI سیم‌های کبالت پایه دیده می‌شود که ناشی از حرکت برگشت پذیر دیواره‌های مغناطیسی است. در هنگام اندازه‌گیری برای جلوگیری از بروز اثرات غیرخطی که ممکن است در جریان‌های نسبتاً پایین رخ دهند، باید جریان مناسبی انتخاب شود.