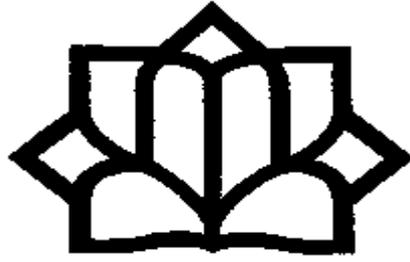


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان :

اثر بازیخت جریانی بر

امپدانس مغناطیسی بزرگ نوارهای آمورف کبالت پایه

استاد راهنما :

دکتر سید احسان روزمه

استاد مشاور:

دکتر محمد الماسی

بوسیله ی :

اکبر رحمتی

بهمن ماه ۱۳۸۸

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: بررسی اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ.....
۲	۱-۱-مقدمه.....
۲	۲-۱-تاریخچه.....
۳	۳-۱-کاربردهای امپدانس مغناطیسی بزرگ (GMI).....
۴	۱-۳-۱-کاربردهای ناشی از اندازه گیری میدان در حسگر های جابجایی و تحلیل های جریان و غیر مخرب.....
۴	۲-۳-۱-کاربردهای حسگر امپدانس تنش.....
۵	۳-۳-۱-حسگرهای مگنتوالاستیک بر پایه امپدانس تنش.....
۶	۵-۳-۱-کاربردهای میکروویو RF.....
۶	۴-۱-معرفی اثر امپدانس مغناطیسی.....
۸	۱-۴-۱-تئوری مختصر.....
۱۲	۲-۴-۱-نواحی فرکانسی خیلی پائین.....
۱۴	۳-۴-۱-ناحیه فرکانس های پائین - متوسط.....
۱۵	۴-۴-۱-فرکانس های متوسط ،ناحیه فرکانس های پائین.....
۱۷	۵-۴-۱-فرکانس های متوسط ، ناحیه فرکانس های رادیوئی.....
۱۸	۶-۴-۱-ناحیه فرکانس های بالا.....
۲۰	۷-۴-۱-تئوری کامل ، قابل استفاده در تمام فرکانس ها.....
۲۳	۸-۴-۱-معرفی چند مدل.....
۲۸	۵-۱-شرایط مواد مورد بررسی.....
۲۸	۱-۵-۱-ابعاد نمونه.....
۳۵	۲-۵-۱-امپدانس مغناطیسی و القاء ناهمسانگردی.....
۳۷	۳-۵-۱-جریان ادی - اتلاف در حرکت دیواره حوزه ها.....
۳۹	۶-۱-اثر نامتقارنی امپدانس مغناطیسی بزرگ (AGMI).....
۴۱	۷-۱-مواد فرو مغناطیسی نرم.....
۴۳	۸-۱-اثر بازیخت مغناطیسی.....
۴۴	۹-۱-روش ساخت نوارفرو مغناطیسی.....
۴۵	۱۰-۱-ساختار و میکرو ساختار آلیاژهای آمورف و نانو بلوری.....
۴۵	۱-۱۰-۱-اطلاعات پس زمینه.....

۴۸.....	۱-۱۰-۲-فرآیندهای مشخص کردن میکروساختاری و آنالیز طیفی آمورف و نانو بلوری.....
۵۰.....	۱-۱۱-رفتار بعد از آماده شدن.....
۵۲.....	۱-۱۱-۱-ارزیابی ساختاری(فرآیند بلوری شدن آلیاژ فاینمنت).....
۵۵.....	فصل دوم: مروری بر برخی از کارهای انجام شده.....
۵۶.....	۱-۲-اثر تبلور سطح.....
۵۷.....	۲-۲-اثر تبلور سطح روی منحنی مغناطش موضعی فاز آمورف و نانو بلوری.....
۶۱.....	۳-۲-نحوه‌ی تبلور حین بازپخت و اکسید شدن سطح.....
۶۳.....	۲-۴-اثر لایه های سطح بلوری روی امپدانس مغناطیسی غیر قطری (نامتقارنی) در نوار های مغناطیسی آمورف CoFeSiB
۶۶.....	۲-۵-اثر بازپخت جریانی - میدانی روی امپدانس مغناطیسی نوارهای کبالت پایه.....
۶۸.....	۲-۶-اثر امپدانس مغناطیسی در نوارهای آمورف بازپخت لیزری $Co_{68.25}Fe_{45}Si_{12.25}B_{15}$
۶۹.....	فصل سوم: بررسی آزمایش ها و تئوری در مورد آنها.....
۷۰.....	۳-۱-نحوه‌ی بازپخت جریانی با میدان و بدون میدان.....
۷۲.....	۳-۲-روش اکسید زدایی.....
۷۲.....	۳-۳-نحوه ی اندازه گیری GMI
۷۶.....	۳-۴-نحوه ی اندازه گیری AGMI
۷۸.....	فصل چهارم: نتایج آزمایش‌های انجام شده.....
۷۹.....	۴-۱-۱-آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه های $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$
۸۴.....	۴-۱-۲-اثر اکسید زدایی.....
۸۸.....	۴-۲-۲-آزمایش های انجام شده روی نوار $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$
۸۸.....	۴-۲-۱-بررسی منحنی GMI
۹۲.....	۴-۲-۲-بررسی منحنی AGMI برای حالت های خام ، بازپخت شده در ۱۰۰۰ میلی‌آمپر ، ۱۲۰۰ میلی‌آمپر و ۱۳۰۰ میلی‌آمپر.....
۹۳.....	۴-۲-۳-بررسی اثر اکسید زدایی بر روی نرمی مغناطیسی و AGMI نوار بازپخت شده در ۱۱۰۰ میلی‌آمپر.....
۹۵.....	۴-۳-نتایج.....
۹۶.....	۴-۴-پیشنهادها.....
۹۷.....	فهرست مراجع.....

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۱- اثر عمق پوسته در نمونه‌ی فرومغناطیسی.....
۹	شکل ۱-۲- تعریف امپدانس برای یک تکه سیم.....
۱۱	شکل ۱-۳- امپدانس ناشی از تسمه مغناطیسی نامبرده شده بر حسب میدان و فرکانس.....
۱۶	شکل ۱-۴- R قسمت حقیقی، X: قسمت موهومی از امپدانس وابسته به میدان مغناطیسی dc.....
۱۶	شکل ۱-۵- نسبت Z/R_{dc} بر حسب میدان مغناطیسی dc.....
۱۷	شکل ۱-۶- نمودار Z/R_{dc} برای سیم $Si_{12.5}B_{15}(Fe_{0.06}Co_{0.04})_{75.2}$ بعد از اعمال تنش.....
۱۸	شکل ۱-۷- نسبت GMI بر حسب میدان مغناطیسی بعد از چند نوع استرس متفاوت.....
۲۹	شکل ۱-۸- منحنی پسماند میدان پایین به عنوان تابعی از مکان.....
۳۰	شکل ۱-۹- میدان وادارندگی بر حسب فاصله.....
۳۱	شکل ۱-۱۰- وابستگی امپدانس مغناطیسی به میدان یکنواخت خارجی به عنوان تابعی از مکان X.....
۳۱	شکل ۱-۱۱- وابستگی امپدانس مغناطیسی به میدان یکنواخت خارجی به عنوان تابعی از مکان X.....
۳۲	شکل ۱-۱۲- منحنی پسماند میدان پایین به عنوان تابعی از طول.....
۳۲	شکل ۱-۱۳- میدان وادارندگی بر حسب طول.....
۳۳	شکل ۱-۱۴- وابستگی امپدانس مغناطیسی به میدان یکنواخت خارجی.....
۳۳	شکل ۱-۱۵- وابستگی امپدانس مغناطیسی به میدان یکنواخت خارجی.....
۳۶	شکل ۱-۱۷- حلقه پسماند در جهت طولی، پذیرفتاری مغناطیسی عرضی، امپدانس مغناطیسی.....
۴۲	شکل ۱-۱۸- طرحواره‌ای از منحنی پسماند و نمودار هرزر یک نمونه.....
۴۴	شکل ۱-۱۹- شکل کلی وسیله‌ی ذوب چرخان برای تولید نوارهای فلزی.....
۴۷	شکل ۱-۲۰- تابع‌های اتصال جفتی، یک بلور کامل، یک اوردر رنج -کوتاه (آمورف)، مواد.....
۴۸	شکل ۱-۲۱- تصویری از اثر پهن شدگی در ذره ریز و بلور کامل.....
۵۲	شکل ۱-۲۲- طرح واره‌ای از فرآیند بلوری شدن.....
۵۸	شکل ۲-۱- حلقه‌های پسماند کر برای بخش میکرو مختلف.....
۵۹	شکل ۲-۲- تغییر H_c در راستای محوری نوار.....
۵۹	شکل ۲-۳- حلقه‌های پسماند کر روی نوار آمورف بازپخت شده در ۸ ساعت.....
۶۰	شکل ۲-۴- توزیع‌های وادارندگی H_c نوار آمورف بازپخت شده در راستای عرضی.....
۶۱	شکل ۲-۵- حلقه‌های پسماند کر روی نوارهای آمورف بازپخت شده در ۸ ساعت تشکیل شده.....
۶۲	شکل ۲-۶- طرح واره‌ای از فرآیند اکسید سطحی و تبلور نمونه بعد از بازپخت.....
۶۴	شکل ۲-۷- وابستگی اندازه‌گیری شده‌ی Z_c به H_c در فرکانس ۱۰۰ kHz.....

- شکل ۲-۹- وابستگی میدانی MIR..... ۶۷
- شکل ۲-۱۰- MIR_{max} برای میدان های مغناطیسی اعمالی مختلف حین بازپخت جریانی..... ۶۷
- شکل ۳-۱- نمونه نوار مورد آزمایش..... ۷۰
- شکل ۳-۲- نگهدارنده ی مخصوص بازپخت جریانی..... ۷۱
- شکل ۳-۳- چیدمان مخصوص بازپخت میدانی عرضی..... ۷۲
- شکل ۳-۴- رابطه ی تقریبی اندازه گیری شده توسط تسلا متر بین میدان و جریان اعمالی..... ۷۴
- شکل ۳-۵- نگهدارنده مخصوص اندازه گیری GMI..... ۷۴
- شکل ۳-۶- چیدمان اندازه گیری GMI..... ۷۵
- شکل ۳-۷- بهینه ی جریان اعمالی برحسب میلی آمپر روی نوار خام با اندازه گیری GMI..... ۷۶
- شکل ۳-۸- تغییرات GMI نسبت به فرکانس برای نوار آمورف خام با اندازه گیری GMI نوار آمورف خام..... ۷۶
- شکل ۴-۱- نمودار XRD مربوط به نوارهای آمورف..... ۷۹
- شکل ۴-۲- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده بدون میدان مستقیم و نمونه ی خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۰۸) اورستد..... ۷۹
- شکل ۴-۳- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده بدون میدان مستقیم و خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۶/۲) اورستد..... ۸۰
- شکل ۴-۴- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده در میدان عرضی مستقیم ۵۰ اورستد و خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۰۸) اورستد..... ۸۰
- شکل ۴-۵- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده در میدان عرضی مستقیم ۵۰ اورستد و خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۶/۲) اورستد..... ۸۱
- شکل ۴-۶- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده در میدان عرضی مستقیم ۱۵۰ اورستد و خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۰۸) اورستد..... ۸۱
- شکل ۴-۷- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده در میدان عرضی مستقیم ۱۵۰ اورستد و خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۰، ۱۶/۲) اورستد..... ۸۲
- شکل ۴-۹- SEM برای حالت خام نمونه..... ۸۳
- شکل ۴-۱۰- میدان های ناهمسانگردی مربوط به نوار های خام و بازپخت شده $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ ۸۴
- شکل ۴-۱۱- فرآیند اکسید شدن ماده و تشکیل نواحی متفاوت و بلوری و نانوبلوری در فرآیند بازپخت جریانی در حضور هوا..... ۸۵
- شکل ۴-۱۲- منحنی GMI نوار خام $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ قبل و بعد از اکسید زدایی..... ۸۶
- شکل ۴-۱۳- منحنی GMI نوار $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ بازپخت شده در ۶۰۰ میلی آمپر قبل و بعد از اکسید زدایی..... ۸۶
- شکل ۴-۱۴- منحنی GMI نوار $Co_{69}Fe_5Si_{15}B_{11}$ بازپخت شده در ۸۰۰ میلی آمپر قبل و بعد از اکسید زدایی..... ۸۷

- شکل ۴-۱۵- میزان افزایش GMI هر یک از نمونه های بازپخت شده ناشی از اکسید زدایی..... ۸۷
- شکل ۴-۱۶- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده و خام $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ در بازه ی میدان مغناطیسی (۱۰۸، ۰) اورستند..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷- منحنی GMI مربوط به نوارهای بازپخت شده و خام $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ در بازه ی میدان مغناطیسی (۱۶/۲) ۰، اورستند..... ۹۰
- شکل ۴-۱۸- بهینه ی GMI در انواع نوارهای بازپخت شده و خام $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ ۹۰
- شکل ۴-۱۹- میدان های ناهمسانگردی مربوط به نوار های خام و بازپخت شده $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ ۹۱
- شکل ۴-۲۰- منحنی GMI در بازه ی تغییر میدان مغناطیسی (۱۰۸، -۱۰۸) اورستند..... ۹۲
- شکل ۴-۲۱- حلقه ی پسماند مغناطیسی برای حالت های قبل از اکسید زدایی و بعد از اکسید زدایی نوار بازپخت شده ی $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ ۹۳
- شکل ۴-۲۲- منحنی GMI قبل و بعد از اکسید زدایی برای نوار $Co_{67}Fe_5Si_{15}B_{13}$ بازپخت شده در ۱۱۰۰ میلی آمپر..... ۹۴

چکیده

در سال‌های اخیر حسگرهای مغناطیسی بر اساس اثر هال^۱ و مقاومت مغناطیسی بزرگ^۲ (GMR) و مقاومت ظاهری مغناطیسی بزرگ^۳ (GMI) تولید شده است. اثر مقاومت ظاهری مغناطیسی بزرگ^۴ (GMI) شامل تغییر بزرگ مقاومت ظاهری الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی ایستا می باشد.

به طور کلی موادی که برای این اثر استفاده می‌شود باید نرمی خوبی از لحاظ فرومغناطیسی داشته باشند که به عبارتی باید دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالا، ناهمسانگردی کوچک، تنگش مغناطیسی کوچک، دمای کوری بالا و .. باشند. روش‌های زیادی برای نائل شدن به این نوع خواص مورد نظر به کار گرفته شده است که روشهایی نظیر اثر بازپخت مغناطیسی، نحوه ریخته شدن آلیاژی و ترکیبات آلیاژی، شکل نمونه، از جمله‌ی آنها می‌باشد.

حسگرهای مغناطیسی بر مبنای GMI کاربردهای متنوعی دارند. این نوع حسگرها در صنایع خودرو، الکترونیک، پزشکی، کشتی سازی و ... کاربرد دارند.

در این پایان نامه اثر بازپخت جریانی و اکسیدزدایی سطح و همچنین تاثیر آنها روی GMI نوارهای آلیاژی کبالت پایه بررسی شده است. در اینجا روشهای بازپخت جریانی اعم از بدون میدان و با میدان مستقیم عرضی و از روش سایش توسط پودر آلومینا برای اکسیدزدایی سطح استفاده شده است.

کلمات کلیدی:

مقاومت ظاهری مغناطیسی بزرگ، پذیرفتاری مغناطیسی، ناهمسانگردی مغناطیسی، دیوار حوزه-ی مغناطیسی، حوزه‌ی مغناطیسی، نوار آلیاژی آمورف، بازپخت جریانی، اکسیدزدایی.

^۱ Hall effect

^۲ Giant Magnetoresistance (GMR)

^۳ Giant Magnetoimpedance (GMI)

فصل اول

بررسی اثر امیدانس مغناطیسی بزرگ

۱-۱- مقدمه

بیشینه‌ی تغییر امپدانس الکتریکی یک ماده‌ی فرومغناطیسی نرم با تغییر میدان مغناطیسی اعمالی بر آن را امپدانس مغناطیسی بزرگ^۱ GMI می‌گویند .

روی این اثر به لحاظ تئوری و تجربی کارهای زیادی انجام شده است . از جمله موادی که روی آنها اثر GMI انجام شده است ، نوارها و سیم‌های آلیاژی ، چند لایه‌ای‌ها ، فیلم ها ، میکرو سیم‌ها ، میکرو تیوب‌ها ، ترکیب‌هایی به صورت آمورف و نانوبلوری انجام شد که هر کدام از آنها کاربرد هایی از قبیل حسگری تنش و میدان می‌توانند داشته باشند.

عوامل موثر بر روی GMI ، اثر پوسته ، شکل نمونه ، ترکیب آلیاژی ، اثر سطح ، بازپخت مغناطیسی و تنش و هر عامل دیگری که بر روی ناهمسانگردی مغناطیسی و ترکیب ساختاری نمونه می‌تواند اثر داشته باشد هستند.

اگر در دو جهت متفاوت برای میدان مغناطیسی اعمالی در جهت طولی نمونه اندازه‌گیری امپدانس انجام شود و منحنی GMI مربوط به هریک از جهت‌های اندازه‌گیری نسبت به هم نامتقارن باشند نامتقارنی امپدانس مغناطیسی بزرگ^۲ AGMI در نمونه وجود دارد. نامتقارنی امپدانس مغناطیسی بزرگ نیز یکی از اثرهایی است که اخیرا دیده شده است که به سه نوع تقسیم می‌شود: ۱- نامتقارنی بایاس جریان ، ۲- نامتقارنی بایاس میدانی ، ۳- نامتقارنی بایاس تبدلی . هر کدام از این نامتقارنی‌ها می‌تواند کاربردهایی داشته باشد ، به عنوان مثال نامتقارنی بایاس جریان به عنوان حسگر جریان الکتریکی و نامتقارنی بایاس تبدلی به عنوان حسگر میدان مغناطیسی با دقت بالا می‌تواند کاربرد داشته باشد.

۱-۲- تاریخچه

اثر GMI در ابتدا در سال ۱۹۳۵ توسط هریسون^۳ گزارش شد و در سال ۱۹۹۴ به طور گسترده تحقیق شد. از دیدگاه تئوری ، تحقیق بر روی GMI با گسترش مدل‌هایی برای درک کامل نمودارهای تجربی، از قبیل ظهور ساختارهای دوقله‌ای، وابستگی امپدانس به فرکانس و میدان مغناطیسی و عوامل دیگر شروع شد. GMI نخستین بار در نوارهای آمورف مغناطیسی نرم و سیم‌ها مشاهده شد. پس از آن

¹ Giant magnetoimpedance (GMI)

² Asymmetric giant magnetoimpedance (AGMI)

³ Harrison

این اثر در سیستم های مختلفی از قبیل مواد تجاری با اشکال مختلف ، فیلم های نازک ، ساختارهای ساندویچی، تیوبها، بلورهای منفرد، میکروسیم های آمورف، مواد نانو بلوری و ... مشاهده شد. مفاهیم عمیقی در GMI نهفته است که این مفاهیم ، پیش بینی برخی رفتارهای مغناطیسی مواد مغناطیسی را برای محققان، ممکن می سازد و این اجازه را می دهد که در ساختارهای مواد مغناطیسی با در نظر داشتن این رفتار در مواد، بتوان ماده مورد نظر را برای شرایط دلخواه، راحت تر تولید کرد. بطور کلی امیدانس بسیار زیاد شاخه جدیدی از خواص تراورد مواد مغناطیسی باز کرده است.[۱]

۱-۳- کاربردهای امیدانس مغناطیسی بزرگ (GMI)

اگر چه تا کنون کاربردهای GMI بررسی شده است اما هنوز مکانیزم اساسی اثر شناخته نشده است. برخی از محققان این اثر را ناشی از نظریه تغییر عمق پوسته می دانند که در این نظریه، نفوذپذیری مغناطیسی دایره ای نقش اساسی را بازی می کند. دیگر محققان دیدگاه دیگری را پذیرفتند که در این دیدگاه خطوط جریان به وسیله دیواره های حوزه مغناطیسی در جهت عمود بر جهت جریان، کشیده شده اند. علاوه بر جنبه های اساسی مربوط به دینامیک مغناطش و میکرومغناطیس ، یکی از اهداف پدیده GMI ، به کارگیری آن در دستگاه های حسگر مغناطیسی است. همان گونه که قبلاً ملاحظه کردیم تحت شرایط مناسب خاصی (خاصیت خیلی نرم بودن مغناطیسی، ناهمسانگردی مغناطیسی کافی و هندسه مناسب) GMI با حضور عوامل خارجی از قبیل میدان مغناطیسی استاتیک و تنش های مکانیکی، تغییر می کند. نتیجتاً تغییر امیدانس به عنوان اصلی برای اندازه گیری و حس کردن تغییرات مربوطه در میدان مغناطیسی و تنش و پیچش، به کار می رود.

موارد استفاده از امیدانس مغناطیسی بزرگ به عنوان حسگر عبارتند از: صنعت اتومبیل، اندازه گیری های صنعتی، تکنولوژی اطلاعات و کامپیوتر، بیومغناطیس، پزشکی و حسگرهای محیطی ، انرژی و توان الکترونیک، ایمنی، اندازه گیری های تحقیقاتی و علمی.

چند نمونه از این حسگرها عبارتند از: حسگرهای میدان مغناطیسی (تکنولوژی فیلم نازک و سیم) حسگرهای جریان، جابجایی، چرخش (این کاربردها ناشی از حس کردن میدان است)، حسگرهای تنش یا فشار ، کاربردهای میکروویو.

۱-۳-۱- کاربردهای ناشی از اندازه گیری میدان در حسگرهای جابجایی و

تحلیل های جریان و غیر مخرب

تعداد زیادی از حسگرها بر پایه اصل GMI طراحی شده و کار می کنند. حسگرهای جریان که بر پایه اندازه گیری میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله جریان عمل می کنند، یک نمونه از این حسگرها هستند. میدان اطراف یک لایه حامل جریان را با پیچاندن سیم (به عنوان حسگر) حول آن لایه اندازه گیری می کنند. این دستگاه ابعاد کوچکی دارد ($1 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$). و رابطه خطی بین جریان و ولتاژ GMI به وسیله نظم هندسی برقرار می شود.

خانواده متفاوتی از حسگرهای جابجایی برای اهداف متفاوت ساخته شده است. در این حسگرها میزان جابجایی می تواند ناشی از حس کردن میدان مغناطیسی باشد یا ناشی از یک مولد میدان ثابت در یک نقطه که با فاصله، میدان آن تغییر می کند. یکی از کاربردهای این حسگر ثبت علامت ویژه اتومبیلی است که قصد ورود به محل پارک را دارد یا در خیابان در حال حرکت است که با کمک این حسگر می توان حرکت اتومبیل و چگالی ترافیک در خیابان را کنترل کرد.

در کاربردی دیگر می توان با کمک حسگرهای مغناطیسی GMI محل تومور در مغز را آشکار کرد. این حسگر می تواند ذرات مغناطیسی خوشه ای شکل موجود در تومور را تشخیص دهد. (با قدرت تفکیک ۱۰ میکرو گوس) کاربرد دیگر در علامت مغناطیسی در کشتی ها استفاده می شود که در جای خود بسیار با اهمیت است. یک ساختار تشکیل شده از سیم های GMI جدا از هم در کنار سخت افزارها و نرم افزارها توانایی انجام این کار را دارند. دو مورد ذکر شده در بالا نمونه هایی از تست غیر مخرب هستند. تحلیل غیر مخرب^۱ تکنولوژی است که شدیداً در دنیا استفاده می شود. زیرا سیستم های مورد استفاده در صنعت به ویژه فلزات به مرور زمان فرسوده می شوند. با کمک امپدانس مغناطیسی می توان بر روی برخی ساختارهای فلزی از جمله شبکه های لوله ای شکل حتی در زمان استفاده از آنها تحلیل های غیر مخرب انجام داد. در استفاده از GMI به عنوان تست کننده غیر مخرب در ساختارهای فلزی در صنعت نفت، لوله ها را با عایق کاری گرمایی می پوشانند و آنها را از فرسوده شدن و ترک برداشتن، حفظ می کنند.

۱-۳-۲- کاربردهای حسگر امپدانس تنش

به علت وابستگی امپدانس مغناطیسی به استرس، می توان از آن به عنوان حسگر اندازه گیری استرس استفاده کرد که این ماده از مواد مغناطیسی تهیه شده است. این اصل به طور موفقیت آمیزی روی نوار

¹ Non-destructive analyses

آمورف CoFeSiB با حساسیت 214 Mpa/Oe در فرکانس ۱ مگا هرتز آزمایش شد [۱]. در حسگرهای مگنتوالاستیکی که در آن از میکروسیم استفاده می‌شود، ما به خاطر قطر کوچک، به مقاومت الکتریکی زیاد احتیاج داریم. تغییرات زیاد GMI موجب تغییرات زیاد ولتاژ (تحت اعمال بار مکانیکی) می‌شود (در فرکانس ۱۰ مگا هرتز، تغییر قله ولتاژ برای بار سه گرمی حدوداً ۵ ولت می‌شود).

۱-۳-۳- حسگرهای مگنتوالاستیک بر پایه امپدانس تنش

به طور کلی حسگرهای مگنتوالاستیک بر پایه استرس امپدانس کاربردهای زیادی در صنعت پزشکی دارند. در ابتدا، یک حسگر حساس استرس بر پایه مدار CMOS، IC توسط کسوموتو^۱ از مرتبه ۴۰۰۰ ساخته شد. سپس چیریاک^۲ یک حسگر ضربان خون ساخت که با استفاده از آن می‌توان چرخش خون و سلامتی بدن را تشخیص داد. و نیز عکس بردار مغز مکانیکی حسگر دیگری بر پایه استرس امپدانس است که با آشکارسازی تغییر شکل کوچک پوست در مرکز پیشانی می‌تواند پی به فعالیت مغزی ببرد. [۱]

۱-۳-۴- امپدانس مغناطیسی بزرگ به عنوان حسگر

عنصر GMI که در دستگاه‌های حسگر مغناطیسی استفاده می‌شود معمولاً به شرایط مغناطیسی ویژه‌ای نیاز دارد تا پاسخ GMI را بهینه کند. این شرایط در حین ساخت به نمونه تحمیل می‌شود. (مثل وجود میدان مغناطیسی یا فشار و عوامل دیگر در حین ساخت)

پاسخ GMI نامتقارن در بعضی موارد برای سهولت اندازه‌گیری مهم است. از این رو AGMI، می‌تواند با القا کردن یک ناهمسانگردی مارپیچی به وسیله بازپخت در حضور پیچش یا فقط به کارگیری یک استرس پیچشی در طول اندازه‌گیری، ایجاد شود. در هر دو مورد یک جریان اضافی مستقیم باید به جریان وارد شده متناوب اضافه شود. نامتقارنی به واسطه‌ی بازپخت میدانی در هوا تولید می‌شود و نیازی به جریان ندارد.

در مورد استفاده از فیلم‌های نازک یا ساندویچ مانند به عنوان نوک حسگر، به ناهمسانگردی مغناطیسی تک محوری نیاز داریم که این کار به وسیله بازپخت با حضور میدان مغناطیسی در طول محور آسان انجام می‌گیرد.

وقتی استرس امپدانس به عنوان اصلی برای اندازه‌گیری استفاده شود یک عملیات پیش گرمایی با حضور استرس کششی لازم است که بدین طریق یک ناهمسانگردی عرضی همگن القا می‌شود و پاسخ GMI را بهتر می‌کند. نهایتاً چندین ویژگی در GMI وجود دارد که باید از وجود آنها جلوگیری شود.

¹ Kusumoto

² Chiriac

یکی از آنها اثر غیر تطبیقی^۱ است که وقتی پاسخ مغناطیسی به زمان وابسته باشد، خود را نشان می‌دهد که این پدیده‌ای ناخواسته برای عناصر حسگر است و می‌تواند شدیداً به وسیله عملیات گرمایی ویژه‌ای کاهش یابد. از طرفی دیگر GMI رفتار پسماند را از خود نشان می‌دهد (به ویژه در محدوده میدان‌های پایین). که این رفتار نیز برای حسگرها نامطلوب است و مربوط به حرکت برگشت ناپذیر دیواره حوزه‌ها (به علت اعمال میدان مستقیم یا تنش) است که به وسیله عملیات گرمایی مناسب کاهش می‌یابد.

۱-۳-۵- کاربردهای مایکروویو RF

یکی از این کاربردهای جالب امپدانس مغناطیسی بزرگ در عناصر حسگر در مدارهای بدون سیم از جمله موس رایانه است. چنین حسگرهایی نیاز به منبع تغذیه ندارند.[۱]

۱-۴- معرفی اثر امپدانس مغناطیسی

پدیده امپدانس مغناطیسی^۲ (MI) یعنی تغییر امپدانس الکتریکی نسبت به میدان $Z = R + iX$ که R قسمت حقیقی یا مقاومت^۳ و X قسمت موهومی یا رئوکتانس^۴ می‌باشد (مواد مغناطیسی نرم هنگامی که این مواد تحت تأثیر میدان مغناطیسی dc یا تحت فشار یا استرس مکانیکی باشد. در صورتی که این اثر در ماده مورد نظر مقدار زیادی از خود نشان دهد، امپدانس مغناطیسی اندازه‌گیری شده را امپدانس مغناطیسی بزرگ^۵ می‌نامند. نسبت امپدانس مغناطیسی معمولاً با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

که $|Z| = R^2 + X^2$ و H_{\max} مقدار میدانی است که در آن ماده از نظر مغناطیسی اشباع می‌شود. برای مثال، مقدار بیشینه‌ی GMI گزارش شده تاکنون حدود ۶۰۰٪ است. این رقم برای میکروسیم آمورف در فرکانس یک مگاهرتز با وجود میدان بیشینه حدود چند هزار آمپر برمتر (A/m) یا چند ۱۰ اورستد می‌باشد که نمونه مغناطیسی در این میدان اشباع می‌شود. [۱]

¹ disaccommodation effect

² Magnetoimpedance(MI)

³ Resistance (R)

⁴ Reactance

⁵ Giant Magnetoimpedance(GMI)

تعریف امپدانس بر اساس رابطه $Z(\omega) = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = R + iX$ همواره برای رساناهای فرومغناطیس

قابل کاربرد نیست. زیرا معمولاً یک دسته از مواد، اجزاء خطی از این تعریف نیستند. به عنوان مثال U_{ac} همواره متناسب با I_{ac} نمی‌باشد و اگر I_{ac} هارمونیک باشد، U_{ac} معمولاً این‌طور نیست.

اگرچه استفاده گسترده از $\frac{\Delta Z}{Z}$ به عنوان تعریف اثر امپدانس مغناطیسی، ممکن است برای مشخص کردن تغییرات به دست آمده زیاد امپدانس مفید باشد، اما در حقیقت برای فیزیک بسیار مفید نیست. حتی اگر چنین بستگی خطی را به Z داشته باشد و بتوان به طور ساده آنرا محاسبه کرد، باز چندین دلیل برای پذیرفتن تعریف دیگری وجود دارد:

الف): اطلاعات در مورد جابجائی فاز کم می‌باشد.

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

ج): نسبت $\frac{\Delta Z}{Z}$ به اینکه چه اندازه از جریان، در $Z(H_{max})$ وارد می‌شود، نسبتاً حساس است. از این دیدگاه، تعریف به وسیله نسبت $\frac{Z}{R_{dc}}$ مناسب‌تر است.

مشخصه عمومی موادی که اندازه‌گیری امپدانس بر روی آنها انجام می‌شود، رفتار مغناطیسی نرم برجسته آنهاست، وقتی در راستای دایروی و یا عرضی مغناطیسی می‌شوند. مبدا و سرچشمه اثر امپدانس مغناطیسی، تغییرات کنترل شده عمق پوسته^۱ است. اثر پوسته^۲ اثری است که از سالها قبل به وسیله الکتروپدینامیک کلاسیک برای رساناهای فلزی شرح داده شده است. به واسطه این اثر، یک جریان ac با فرکانس بالای f در تمامی سطح مقطع رسانا شارش نمی‌یابد (شکل (۱-۱))، بلکه در

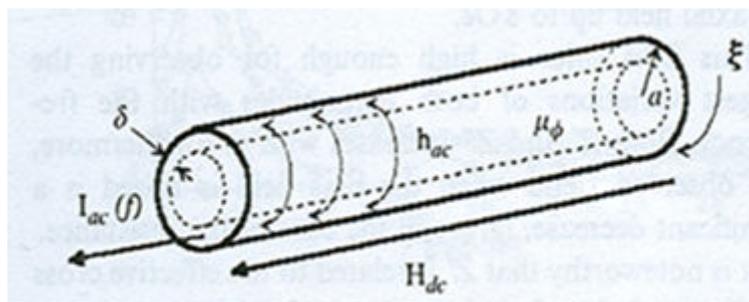
پوسته‌ای نزدیک به سطح رسانا با عمق $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$ محدود می‌شود. (ρ مقاومت ویژه، μ

نفوذپذیری مغناطیسی و $\omega = 2\pi f$) در مواد مغناطیسی نرم، اعمال یک میدان مغناطیسی dc خارجی،

تغییراتی در نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر ایجاد می‌کند که عمق پوسته را اصلاح می‌کند. [۱]

¹ Skin depth

² Skin effect



شکل (۱-۱): نمایی کلی از اثر عمق پوسته در یک نمونه‌ی فرومغناطیس [۲]

۱-۴-۱- تئوری مختصر

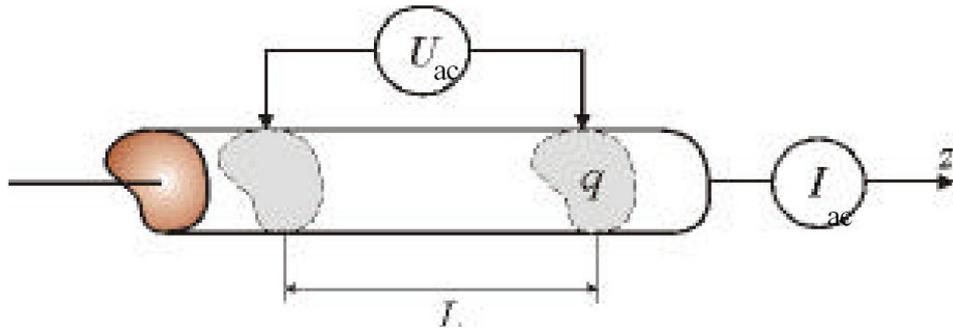
در ابتدا به نکته مهمی که می‌خواهیم اشاره کنیم این است که محاسبات ارائه شده برای سیم با ناهمسانگردی دایروی همانند فیلم با ناهمسانگردی عرضی می‌باشد. اجازه دهید یک رسانای بلند نامحدود فرض کنیم که از قانون اهم $\vec{E} = \rho \vec{j}$ تبعیت می‌کند، E میدان الکتریکی ac داخل ماده است، ρ مقاومت و j چگالی جریان متناوب می‌باشد. در این حالت سطح مقطع q را برای سیم فرض می‌کنیم. امپدانس Z اندازه گیری شده و بین دو نقطه از این رسانا به طول L به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = \frac{\int_L e_z(S) dz}{\iint_q j_z dq} = \rho \frac{\int_L j_z(S) dz}{\iint_q j_z dq} \quad (۲-۱)$$

که J_z و $e_z = \rho J_z$ به ترتیب دامنه مؤلفه طولی چگالی جریان ac و میدان الکتریکی ac هستند. S به سطح مقطع رسانا اشاره دارد و چگالی جریان J مستقل از Z می‌باشد. بنابراین فرض داریم:

$$\frac{Z}{R_{dc}} = \frac{j_z(S)}{\langle j_z \rangle_q} \quad (۳-۱)$$

در این حالت $R_{dc} = \rho l / q$ ، مقاومت dc و $\langle \rangle_q$ مقدار میانگین در سطح q را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود Z/R_{dc} ، به صورت نسبت چگالی جریان در سطح رسانا به مقدار میانگین آن تعریف می‌شود.



شکل (۲-۱): تعریف امپدانس برای یک تکه سیم [۱]

که $I = \oint_C h_{\phi} dc$ محیط در بردارنده سطح q می باشد و جریان کل با رابطه زیر داده می شود:

$$I_{ac} = lh\phi(s) \quad (۴-۱)$$

$h_{\phi}(s)$ مؤلفه دایروی (مارپیچی) میدان مغناطیسی ac بوده و بر سطح رسانا مماس و به جهت Z عمود می باشد، l نیز مقدار محیط سطح q می باشد.

در فلزات رابطه بین مؤلفه مماسی e و h در سطح ماده می تواند با رابطه تانسوری زیر تعریف شود:

$$e_i(S) = \zeta n \times h_i(S) \quad (۵-۱)$$

که n بردار عمود بر سطح رسانا است و جهت آن به سمت بیرون می باشد. با استفاده از معادلات (۱-۵) و (۲) رابطه بین Z و امپدانس سطحی بدست می آید.

$$Z = \frac{L}{l} \left(\zeta_{zz} - \zeta_{z\phi} \frac{h_z}{h_{\phi}} \right) \quad (۶-۱)$$

در حالت خاص تقارنی که تانسور امپدانس سطحی، قطری یا h_z صفر باشد، جمله دوم رابطه فوق صفر می شود و در این حالت امپدانس فقط با ζ_{zz} متناسب است و این امپدانس نشان داده شده، برای یک رسانای با طول نامتناهی می باشد. در مدارهای الکتریکی القای خودبخود I_e رسانا با انرژی مدار متناسب است و این اثر به صورت خودبخود به امپدانس اضافه می شود. اگرچه I_e یا القای خودبخود به ساختار مدار و نمونه بستگی دارد، در اندازه گیری ها در مقدار بدست آمده امپدانس خود را نشان می دهد. در تقریب خطی امپدانس از یک رسانای مغناطیسی می تواند با رابطه های (۱-۲) و (۱-۶) محاسبه شود که هر دو فرمول معادل یکدیگر می باشند. بدلیل اینکه رابطه بین z و h از معادلات ماکسول بدست می آید. $j = \nabla \times h$ هر چند باید گفته شود که J_z مستقل از Z می باشد، وابستگی j_z به Z در فرکانسهای ماکروویو مطرح می شود. یعنی حالتی که طول نمونه با طول موج الکترومغناطیسی ناشی از فرکانس ω که داخل نمونه وارد می شود، قابل مقایسه یا کمتر از آن باشد.

در این صورت جریان I و میدان الکتریکی e_z در جهت Z ثابت نیستند. در این صورت تعریف Z مطابق با معادله I حالت استاندارد خود را از دست می‌دهد، برای اینکه در اینگونه فرکانس‌ها، اندازه گیری به شکل مدار نیز بستگی دارد.

در این صورت بهتر است به امپدانس سطحی Z_s ، ضرایب عبور و بازگشت اشاره کنیم. ماهیت عمیق GMI در این است که در مواد مغناطیسی واقعاً نرم، اثر پوسته در فرکانس‌هایی کمتر از رساناهای غیرمغناطیسی با رسانایی هم ارز (اثر پوسته در رساناهای معمولی در فرکانسهای حدود چند گیگاهرتز می‌باشد)، رخ می‌دهد. GMI نیاز به یک میدان مغناطیسی ثابت نیز دارد که در نفوذ پذیری ac ، عمق پوسته و در نتیجه در امپدانس، بتواند تغییرات حاصل کند. اغلب در مواد فرومغناطیس نفوذ پذیری ac بصورت همگن نمی‌باشد و به جهت میدان‌های مغناطیسی ac ، dc ، آنیزوتروپی و شکل ماده نیز بستگی دارد.

بنابراین نفوذ پذیری ac که در GMI مؤثر است سهم نفوذ پذیری عرضی می‌باشد. بطور خلاصه برای مشاهده GMI ، نفوذ پذیری مغناطیسی عرضی (دایروی برای مواد استوانه ای شکل مانند سیم) باید مقدار زیادی داشته باشد و باید تحت میدان dc تغییر کند. شکل (۱-۳) نمودار وابستگی امپدانس مغناطیسی به فرکانس و میدان مغناطیسی dc برای یک سیم را نشان می‌دهد. اگر به نمودار رسم شده توجه کنید. (بویژه در نقطه ای که مقدار GMI به اشباع می‌رسد، البته این مقدار پس از رسیدن به مقدار مشخص دیگر تغییر نمی‌کند)، Z با رابطه $Z \propto \sqrt{f}$ به فرکانس وابسته است.

مطلب جالب قابل تأمل این است که نقاط مشاهده در قله در نمودار $Z-H$ ، مقداری نزدیک به میدان ناهمسانگردی^۱ دارد. همانطور که قبلاً اشاره شد مواد با مقدار نفوذ پذیری زیاد، اثر پوسته خود را زودتر از فرکانس‌های مواد رسانای معمولی نشان می‌دهند.

در وابستگی امپدانس به فرکانس جریان ac که در نمونه وارد می‌شود، اثر GMI به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

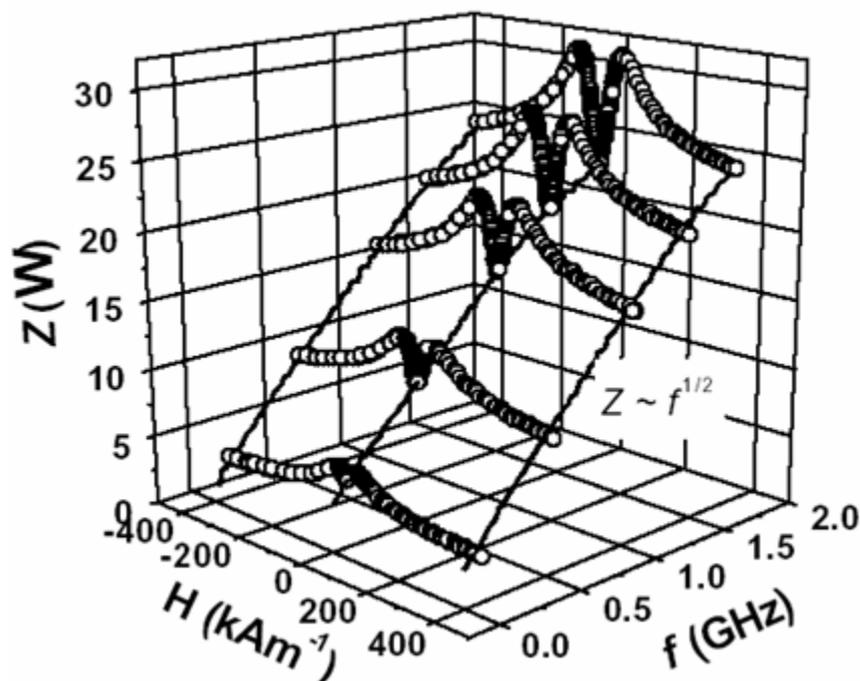
۱- در فرکانس‌های بسیار پائین چند کیلوهرتز تغییرات ولتاژ (متناسب با امپدانس) ناشی از تغییرات مغناطیس (دایروی در سیمها و عرضی در فیلم‌ها) می‌باشد. همچنین این اثر بعنوان القای مغناطیسی^۲ مطرح می‌شود که توسط آقای مهری^۳ و همکارانش مشاهده شد. در این حالت

¹ Anisotropy field

² Magnetoinductive

³ Mohri

Ribbon (as-quenched) $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$



شکل (۱-۳): امپدانس ناشی از تسمه مغناطیسی نامبرده شده بر حسب میدان و فرکانس [۱].

اثر پوسته بسیار کم است. بنابراین در چنین حالتی اگر بپذیریم که اثر پوسته نقش اساسی را بازی می‌کند، در اینجا فقط تغییرات در مغناطش نقش اساسی را بازی می‌کند یعنی القای مغناطیسی وجود دارد.

۲- الف) فرکانس‌های پایین: از ناحیه چند ده کیلوهرتز تا چند مگاهرتز که مطالعه در این بازه فرکانس بر پایه عمق نفوذ مغناطیسی، یعنی تغییرات زیاد در پذیرفتاری مغناطیسی در اثر اعمال میدان dc گذارده می‌شود.

ب) در فرکانس‌های متوسط: چند مگاهرتز تا چند صد مگاهرتز، به شکل نمونه وابسته است. در این ناحیه اثر پوسته نیز پایه علم امپدانس مغناطیسی بزرگ است و حرکت دیواره‌ها و حوزه‌های مغناطیسی اثر خود را کاهش می‌دهند که این تأثیر به علت اتلاف می‌باشد و فقط چرخش مغناطش نقش اساسی را بازی می‌کند.

۳- در فرکانس‌های خیلی بالا: در ناحیه گیگا هرتز، چرخش مغناطیسی شدیداً افزایش می‌یابد (در اثر پدیده ژیرومغناطیس) و قله موجود در نمودار GMI به سمتی حرکت می‌کند که ماده در آنجا به اشباع مغناطیسی خود رسیده است. تغییرات شدید در امپدانس نمونه در اثر پدیده رزونانس (تشدید) فرومغناطیس^۱ رخ می‌دهد.

¹ Ferromagnetic resonance(FMR)

قبل از شروع بحث ابتدا یادآور می‌شویم که تقسیم کردن نواحی به فرکانس‌های متفاوت صرفاً به دلیل روشن کردن موضوع می‌باشد و تا اندازه‌ای اختیاری است. در کنار موارد یاد شده در باره تقسیم بازه‌های فرکانسی، قواعد دیگری نیز مانند موارد زیر موجود است:

۱- تکنیک‌های تجربی برای اندازه‌گیری: ممکن است که بدترین نوع ملاک باشد. چرا که تکنیک‌های متفاوتی برای کار در فرکانس‌های مشابه وجود دارد و نیز تکنیک‌های مشابهی می‌تواند برای چند ناحیه فرکانسی استفاده شود.

۲- نسبت عمق پوسته به عرض ماده (δ/a): این ملاک را تعدادی از نویسندگان مقالات استفاده کرده‌اند. بعنوان مثال ماخنوسکی^۱ در این حالت یک اصطلاح مشترک وجود دارد. $\delta/a \gg 1$ ناحیه ای است که اثر پوسته در آن کم است. با وجود $\delta/a \ll 1$ ، در این صورت اثر پوسته در نمونه بسیار زیاد است. معمولاً اثر پوسته ضعیفی در فرکانس‌های پائین دیده می‌شود. هرچند که δ/a بستگی به بسیاری از پارامترهای دیگر از قبیل عرض ماده مورد نظر، خواص ماده، میدان مغناطیسی و ... دارد. بنابراین این ملاک نمی‌تواند ملاک مناسبی برای تقسیم کردن اثر GMI در فرکانس‌های متفاوت باشد.

نکته مهم دیگری که در تقسیم کردن نواحی مغناطیسی مؤثر است، مکانیزم اساسی فیزیک است که معمولاً مشابه به نظر می‌آید و همچنین تشخیص مکانیزم بین اثر پوسته و تشدید فرومغناطیس نیز به نوبه خود دشوار به نظر می‌رسد. در حقیقت اثر پوسته دلیلی است برای جذب تشدید فرومغناطیسی در فلزات فرومغناطیسی [۱].

۱-۴-۲- نواحی فرکانسی خیلی پائین

در این ناحیه جریان ac وارد شده در نمونه باعث تولید میدان مغناطیسی ac می‌شود. بنابراین اگر نمونه را یک سیم مغناطیسی فرض کنیم، میدان مغناطیسی ac دایروی در نمونه ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی دایروی باعث تولید میدان الکتریکی طولی نمونه می‌شود. این میدان الکتریکی ac که در راستای طول نمونه بوجود آمده است، یک ولتاژ القایی در نمونه ایجاد می‌کند. یعنی می‌توان گفت که ولتاژ القایی بوجود آمده می‌تواند با اندوکتانس (L_i) نمونه مشخص شود. و مقدار L به توزیع فضای پذیرفتاری مغناطیسی در راستای عرضی یا دایروی بستگی دارد. برای مثال، هنگامی که یک جریان متغیر وارد سیم فرومغناطیسی می‌شود مقدار ولتاژ ac (V_T) بین دو انتهای سیم مشاهده می‌شود.

¹ Makhnovskiy