

دانشگاه کاشان

دانشکده فیزیک

گروه فیزیک ماده چگال

پایان نامه

جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان:

مدلی تئوری در بررسی اثر نامتقارنی امیدانس مغناطیسی بزرگ

استاد راهنما:

دکتر سید احسان روزمه

توسط:

مریم فرامرزی

تیر ماه ۱۳۹۲

تقدیم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.

به خواهر و برادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی پشتیبانم بوده اند.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند .

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه ی راهم بود.

الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل بپوشانم .

پروردگارا حسن عاقبت ، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

تقدیر و شکر:

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید احسان روزمه که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم. همچنین بر خود واجب می‌دانم تا از جناب آقای دکتر مهرداد مرادی که با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در انجام امور آزمایشگاه، دریغ ننموده و بنده را راهنمایی نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

(و یزکیهم و یعلمهم الكتاب و الحکمه)

معلما مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

به نکته های دلاویز و گفته های بلند صحیفه های سخن از تو علم پرور باد

از اساتید فرزانه، جناب آقای دکتر عبدالعلی رضانی و جناب آقای دکتر ابراهیم حیدری که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از پدر و مادر عزیز، دلسوز و همسر مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه

درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛ سپاسگزاری نمایم.

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم.

چکیده

اثر امپدانس مغناطیسی (MI) به صورت تغییرات امپدانس الکتریکی رسانای مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی متغیر تعریف می‌شود. بررسی این اثر از سال ۱۹۹۴ پس از گزارش موهری^۱ و همکارانش مبنی بر وجود اثر امپدانس مغناطیسی در سیم کبالت پایه، به طور جدی آغاز شد. امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن (AGMI)^۲ در بهبود هرچه بیشتر حسگرهایی که برحسب جمله‌های خطی بودن و میزان حساسیت به فعالیت در آمده‌اند بسیار مهم است.

در این پایان‌نامه اثر بازپخت جریانی بر امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن نوار آلیاژ آمورف $Co_{66.59}Fe_{3.98}Mo_{1.55}Si_{18.36}B_{9.52}$ و تأیید رفتار امپدانس مغناطیسی نامتقارن به کمک یک مدل نظری بررسی شده‌است. این مدل بر اساس حل هم‌زمان معادلات ماکسول و لاندائو-لیفشیتز برای یک نوار با ضخامت محدود مرکب از یک هسته آمورف داخلی و دو لایه بلور خارجی است. جفت‌شدگی بین لایه‌ی سطحی و هسته‌ی آمورف در جمله‌های میدان بایاس مؤثر مطرح می‌شود نفوذپذیری مغناطیسی μ بر حسب پارامترهای M (مغناطش‌پذیری اشباع)، H_a (میدان ناهمسانگردی تک محوری) و γ (ثابت ژیرومغناطیسی)، α (پارامتر میرایی گیلبرت) و θ (زاویه‌ی تعادل بین بردار مغناطش و محور افقی) است، به دست آمد. زاویه‌ی θ را می‌توان با استفاده از کمینه‌ی انرژی آزاد، به دست آورد.

با نادیده گرفتن حوزه‌های ساختاری و برهم‌کنش تبدالی، بیان تحلیلی برای امپدانس فراهم شد و میدان و فرکانس وابسته به امپدانس مورد مطالعه قرار گرفت.

در این‌جا از روش بازپخت جریانی در حضور هوا استفاده شد که موجب ایجاد نامتقارنی ناشی از بایاس تبدالی در نمونه می‌شود. بهترین نمونه بازپخت شده از لحاظ پاسخ GMI، نسبت به نمونه خام در جریان ۵۰۰ میلی‌آمپر به مدت زمان ۱۵ دقیقه بازپخت شده و اندازه‌گیری GMI مربوط به آن در فرکانس ۴ مگاهرتز و دامنه جریان متناوب ۱۰ میلی‌آمپر انجام شد.

کلمات کلیدی: امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن، لایه‌های بلورین، ناهمسانگردی مغناطیسی، آلیاژهای آمورف، نفوذپذیری مغناطیسی، بازپخت جریانی، حسگرهای مغناطیسی.

¹ Mohri

² Asymmetric Giant MagnetoImpedance

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: اثر امپدانس مغناطیسی
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ امپدانس مغناطیسی
۶	۳-۱ اثر پوسته در فلزات
۸	۴-۱ نظریه امپدانس مغناطیسی
۹	۱-۴-۱ محاسبه‌ی امپدانس مغناطیسی
۱۱	۲-۴-۱ معادلات ماکسول
۱۴	۳-۴-۱ معادله‌ی لاندائو-لیفشیتز:
۱۶	۵-۱ تشریح مدل‌های تئوری:
۱۶	۱-۵-۱ مدل‌های شبه ایستا:
۲۱	۲-۵-۱ میرایی جریان گردابی ناشی از حرکت دیواره حوزه‌ها:
۲۳	۳-۵-۱ مدل‌های تشریح کننده امپدانس مغناطیسی بزرگ در فرکانس‌های بالا:
۲۴	۱-۳-۵-۱ مدل‌های الکترومغناطیسی
۲۷	۲-۳-۵-۱ مدل‌های رسانش-تبادل
۲۹	۶-۱ عوامل تأثیر گذار بر GMI
۲۹	۱-۶-۱ جریان متناوب اندازگیری
۳۰	۲-۶-۱ میدان مغناطیسی
۳۲	۳-۶-۱ فرکانس اندازه‌گیری

صفحه	عنوان
۳۲	۱-۳-۶-۱ امیدانس مغناطیسی بزرگ در نواحی فرکانسی متفاوت
۳۵.....	۴-۶-۱ دمای اندازه‌گیری
۳۶.....	۵-۶-۱ طول نمونه
۳۷.....	۶-۶-۱ ضخامت نمونه
۳۸.....	۷-۶-۱ سطح نمونه
۳۹.....	۸-۶-۱ بازپخت‌ها
۳۹.....	۱-۸-۶-۱ بازپخت گرمایی
۴۰.....	۲-۸-۶-۱ بازپخت میدانی
۴۰.....	۳-۸-۶-۱ بازپخت جریانی
۴۱.....	۴-۸-۶-۱ پخت تنشی
۴۱.....	۵-۸-۶-۱ پخت لیزری
۴۲.....	۷-کاربردهای GMI
۴۲.....	۱-۷-۱ مطالعه و تحقیق خواص مواد
۴۲.....	۲-۷-۱ ساخت حسگر
۴۲.....	۸-۱ انواع حسگرهای GMI
۴۲.....	۱-۸-۱ حسگر میدان مغناطیسی
۴۴.....	۲-۸-۱ حسگر جریان
۴۴.....	۳-۸-۱ حسگر فشار
۴۵.....	۹-۱ کاربردهای دیگر حسگرهای GMI
۴۵.....	۱-۹-۱ ردیابی هدف

عنوان	صفحه
۲-۹-۱ جستجوگر فضا	۴۵
۳-۹-۱ مدارهای الکتریکی	۴۶
۴-۹-۱ ذخیره سازی اطلاعات	۴۶
۵-۹-۱ کنترل ترافیک	۴۷
۶-۹-۱ کاربردهای زیستی	۴۸
۷-۹-۱ آشکارسازی اختلال در میدان مغناطیسی و مکان یابی جغرافیایی	۴۸
۸-۹-۱ بکارگیری حسگر تنشی	۴۹
فصل دوم: امپدانس مغناطیسی نامتقارن	۵۰
۱-۲ مقدمه‌ای بر امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن	۵۱
۲-۲ انواع امپدانس مغناطیسی نامتقارن:	۵۲
۱-۲-۲ نامتقارنی ناشی از جریان بایاس مستقیم	۵۲
۲-۲-۲ نامتقارنی ناشی از میدان بایاس متناوب	۵۴
۳-۲-۲ نامتقارنی ناشی از بایاس تبادلی	۵۶
۳-۲-۲ پدیده‌شناسی بایاس تبادلی	۵۹
فصل سوم: مدلی نظری در امپدانس مغناطیسی نامتقارن در نوارهای آمورف با یک لایه‌ی بلور سطحی	۶۲
۱-۳ اصول نظری	۶۳
۲-۳ امپدانس نوار	۶۴
۳-۳ تانسور نفوذپذیری	۶۶
۴-۳ روند محاسبات برای یافتن امپدانس نوار	۷۲

صفحه	عنوان
۷۵	۵-۳ نتیجه گیری
۷۹	فصل چهارم: نتایج تجربی
۸۰	۱-۴ مقدمه
۸۲	۲-۴ اندازه گیری
۸۵	۳-۴ بازپخت نمونه ها
۸۶	۴-۴ اندازه گیری امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن <i>AGMI</i>
۸۷	۱-۴-۴ نتایج بدست آمده برای نمونه های بازپخت شده با جریان های مختلف در هوا
۹۱	۵-۴ بحث و نتیجه گیری
۹۳	۵-۴ پیشنهادات
۹۴	مراجع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱): شمائی از روش اندازه گیری امپدانس مغناطیسی. (میدان القائی ناشی از جریان می‌باشد [۴]).	۴
شکل (۲-۱): نمای کلی از اثر پوسته در یک فرومغناطیس	۷
شکل (۳-۱): نمایی کلی از اثر عمق پوسته در یک نمونه فرومغناطیس [۹].	۸
شکل (۴-۱): تعریف امپدانس برای قطعه سیمی با سطح مقطع	۹
شکل (۵-۱): طرح یک بعدی از ساختار حوزه‌ها. $2d$ دوره تناوب ساختار حوزه‌ها و u جابجائی دیواره حوزه‌ها از حالت تعادل می‌باشد [۴].	۱۷
شکل (۶-۱): شکل بالا: منحنی پسماند محاسبه شده $M_s(H_s)$. شکل پایین: پذیرفتاری مغناطیسی عرضی برای یک فیلم تک محور. a عمود بر محور آسان فیلم (حرکت دیواره حوزه‌ها)، b ، \bar{H}_0 عمود بر محور آسان فیلم (چرخش ممان‌ها)، C ، \bar{H}_0 موازی محور آسان فیلم [۴].	۲۰
شکل (۷-۱): راستاها و بردارهای موجود در مسئله. بردار \hat{n}_k جهت محور آسان را نشان می‌دهد [۲۳].	۲۵
شکل (۸-۱): تغییر رفتار دو قله‌ای به تک قله‌ای اثر GMI در سیم کبالت پایه با افزایش جریان [۳۱].	۳۰
شکل (۹-۱): وابستگی $\Delta Z/Z$ به میدان مغناطیسی dc در فرکانس‌های متفاوت. شکل داخلی وابستگی فرکانسی $[\Delta Z/Z]_{max}$ را نشان می‌دهد [۴].	۳۱
شکل (۱۰-۱): امپدانس نوار آمورف خام $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ در نقطه‌ای که امپدانس مغناطیسی بزرگ به اشباع می‌رسد Z با \sqrt{f} متناسب است [۴].	۳۲
شکل (۱۱-۱): وابستگی دمایی GMI یک آلیاژ کبالت پایه بازپخت شده در فرکانس ۴ MHz [۴].	۳۶
شکل (۱۲-۱): منحنی GMI میکروسیم با طول‌های متفاوت در فرکانس ۱۰ MHz [۴].	۳۸
شکل (۱۳-۱): وابستگی بیشینه مقدار GMI در سیم Co-Fe-Si-B به قطر سیم [۴].	۳۸

- شکل (۱-۱۴): وابستگی بیشینه امپدانس مغناطیسی و زبری سطح در نوارهای آهن پایه نانو بلوری به تزریق Cr در فرکانس ۲ مگاهرتز [۴]. ۳۹
- شکل (۱-۱۵): منحنی GMI نمونه خام و بازپخت شدهی آلیاژ Fe-Si-Nb-Cu-B در فرکانس ۱۰ MHz [۴]. ۴۰
- شکل (۱-۱۶): تصویر یک حسگر امپدانس مغناطیسی [۵۹]. ۴۳
- شکل (۱-۱۷): طرحی شماتیک از حسگر امپدانس مغناطیسی بدون سیم [۶۰]. ۴۳
- شکل (۱-۱۸): (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) [۶۶]. ۴۴
- شکل (۱-۱۹): حسگر مگنتوالاستیک بر پایه وابستگی اثر GMI به تنش با نمونه حسگری میکروسیم کبالت پایه با روکش شیشه [۶۰]. ۴۵
- شکل (۱-۲۰): مقایسه در اندازه‌ی مدار الکتریکی طراحی شده با حسگر میدان مغناطیسی دریچه شار و امپدانس مغناطیسی [۴۸]. ۴۶
- شکل (۱-۲۱): این اتومبیل بدون راننده و بطور خودکار با استفاده از حسگر MI و مارکت مغناطیسی کنترل می‌شود [۴۸]. ۴۷
- شکل (۱-۲۲): حسگر میدان مغناطیسی بر پایه اثر GMI که در جراحی مغز و اعصاب برای تشخیص غده به کار می‌رود [۶۰]. ۴۸
- شکل (۱-۲۳): تصویر حسگر فشار ساخته شده برای اندازه‌گیری فشار باد چرخ خودرو توسط محققین ژاپنی [۶۰]. ۴۹
- شکل (۲-۱): طرحی شماتیک از روش آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری AGMI ناشی از بایاس جریان مستقیم [۸۳]. ۵۳
- شکل (۲-۲): طرحی شماتیک از روش آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری AGMI ناشی از بایاس میدان متناوب [۷۴]. ۵۵

شکل (۲-۳): نمایش الگووار اثرات اصلی که توسط جفت شدگی تبادلی AFM-FM به وجود آمده است. نظیر (a) انتقال حلقه پسماند، (b) افزایش وادارندگی و (c) ناهمسانگردی تک جهتی [۷۱].

شکل (۲-۴): نمودار اجمالی موقعیت اسپین ها در یک FM-AFM جفت شده قبل و بعد از بوجود آمدن بایاس تبادلی بین آن ها [۷۱].

شکل (۲-۵): نمودار اجمالی از موقعیت اسپین های کوپل شده AFM-FM در مراحل مختلف از یک حلقه پسماند منتقل شده در یک سیستم با K_{AFM} بزرگ [۷۱].

شکل (۲-۶): نمودار اجمالی از موقعیت اسپین هادر لایه AFM-FM در مراحل مختلف برای یک سیستم با K_{AFM} کوچک [۷۱].

شکل (۳-۱): طرح ساده از دستگاه مختصات در محاسبات حاضر است. همه ی بردارها در صفحه ی Z رسم شده است. میدان بایاس H_b در ناحیه ی آمورف در خلاف جهت میدان ناهمسانگردی تک محوری $H_{||}$ در ناحیه ی بلورین قرار دارد [۱۰۴].

شکل (۳-۲): طرح ساده از مسئله [۶۳].

شکل (۳-۳): ولتاژ پاسخ القایی در حضور جریان متناوب I و میدان مغناطیسی aC ، اندازه گیری شده است [۶۳].

شکل (۳-۴): وابستگی $\frac{Z}{R_{DC}}$ نوار به H_e ، در فرکانس $f = 5MHz$ و در زوایای مختلف (الف)

بر $\varphi = 0.45\pi$ و در (ب) $\varphi = 0.35\pi$ و $H_b = 0.25$ و $H_b = 1$ و $H_b = 1.5$

حسب اورستد رسم شده است. پارامتر های نوار مورد محاسبه عبارتند از: $D = 20\mu m$ و $d = 18\mu m$

$4\pi M = 7000Gs$ $\sigma_1 = \sigma_2 = 10^{16-1}$ و $H_a = 2Oe$ و $H_u = 300Oe$ و $\alpha = 0.1$ و $\psi = 0.15\pi$ [۷۵].

شکل (۳-۵): وابستگی $\frac{Z}{R_{DC}}$ نوار به H_e ، در $H_b = 1Oe$ و در فرکانس های مختلف، (الف) $f = 1MHz$ و

(ب) $f = 5MHz$ و (ج) $f = 10MHz$ را نشان می دهد. پارامتر های نوار مورد محاسبه عبارتند از: $D = 20\mu m$

$4\pi M = 7000Gs$ $\sigma_1 = \sigma_2 = 10^{16-1}$ و $H_a = 2Oe$ و $H_u = 300Oe$ و $\alpha = 0.1$ و $\psi = 0.15\pi$ و $\varphi = 0.45\pi$ [۷۷].

- شکل (۴-۱): تصویر دستگاه مذاب چرخان تک غلتک که برای تولید نوارهای فلزی آمورف استفاده می‌شود [۶۰]. ۸۰
- شکل (۴-۲): نمونه‌ای از یک نوار مغناطیسی ۸۱
- شکل (۴-۳): نمودار XRD مربوط به الف) نمونه نوار مورد بررسی ب) شیشه ۸۱
- شکل (۴-۴): (بالا) مدار و (پایین) چیدمان اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی شامل (۱) منبع جریان مستقیم، (۲) مولتی‌متر جهت اندازه‌گیری دقیق جریان اعمالی به سیملوله، (۳) اسیلوسکوپ، (۴) منبع جریان متناوب، (۵) سیملوله، و: سیم‌های ورودی و خروجی نگهدارنده نمونه ۸۲
- شکل (۴-۵): پایه نگهدارنده نمونه جهت اندازه‌گیری GMI ۸۳
- شکل (۴-۶): رابطه تقریبی بین جریان مستقیم عبوری از سیملوله و میدان مغناطیسی یکنواخت ناشی از آن ۸۳
- شکل (۴-۷): تغییرات GMI نمونه خام بر حسب: الف) جریان متناوب اعمالی به نمونه، ب) فرکانس اندازه‌گیری ۸۴
- شکل (۴-۸): پایه ی بازپخت جریانی ۸۵
- شکل (۴-۹): مدار مورد استفاده جهت بازپخت جریانی نمونه ۸۵
- شکل (۴-۱۰): نمودارهای الف) تا ج)، منحنی‌های AGMI مربوط به نمونه‌های بازپخت شده با جریان‌های مختلف در مدت زمان ۱۵ دقیقه (بزرگنمایی منحنی‌ها حول قله در گوشه تصویر نشان داده شده است). ۸۷
- شکل (۴-۱۱): بیشینه GMI محاسبه شده بر حسب جریان‌های بازپخت مختلف در فرکانس و جریان بهینه ۹۰
- شکل (۴-۱۲): الف) مقایسه نمودار XRD نمونه خام (پایین) با نمونه بازپخت شده با جریان ۷۰۰ میلی‌آمپر در مدت زمان ۱۵ دقیقه (بالا)، ب) لیست قله‌های بدست آمده از آزمایش XRD مربوط به این نمونه ۹۰

فهرست علائم و اختصارات

\vec{M}_0	مغناطش تعادلی	AGMI	امپدانس مغناطیسی بزرگ نامتقارن
ρ	مقاومت ویژه	GMI	امپدانس مغناطیسی بزرگ
R_{dc}	مقاومت dc	Z	امپدانس
	مؤلفه ac بردار مغناطش	X	اندوکتانس
			\vec{m}
h	مؤلفه ac میدان مغناطیسی	Oe	اورستد
H_{ann}	میدان بازپخت	\vec{M}	بردار مغناطش
H_b	میدان بایاس موثر	ζ	تانسور امپدانس سطح
q	مساحت سطح مقطع نمونه	$\vec{\chi}(\vec{r})$	تانسور پذیرفتاری مغناطیسی
H	میدان مغناطیسی	K	پارامتر میرایی گیلبرت
H_{eff}	میدان مغناطیسی موثر	β	ثابت استحکام دیواره
H_a	میدان ناهمسانگردی	$\rho(r)$	چگالی بار آزاد
H_u	میدان ناهمسانگردی تکسویه القا شده	j	چگالی جریان الکتریکی
H_c	میدان وادارندگی	L_e	خودالقایی رسانا
H_e	میدان یکنواخت خارجی	σ	رسانندگی
μ	نفوذپذیری مغناطیسی	c	سرعت نور
γ	ضریب ژيرومغناطیس	t_c	ضخامت لایه بلوری
f	فرکانس	δ	عمق پوسته
τ	گشتاور مکانیکی	μ_t	گذردهی مغناطیسی عرضی
		M_s	مغناطش اشباع

فصل اول:

اثر امپدانس مغناطیسی

۱-۱ مقدمه

مطالعات بنیادی که روی مواد مغناطیسی توسط هایزنبرگ^۱ و لاندائو^۲ انجام شد، را می‌توان به عنوان اولین نظریه اثر امپدانس مغناطیسی دانست. امپدانس مغناطیسی (MI) شامل تغییرات امپدانس کل یک رسانای مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی متغیر است. 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 در سال ۱۹۳۵ ارائه داد و بعد از آن در سال ۱۹۹۱ ماخوکین^۴ کار هریسون را برای اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی تکرار کرد. با توجه به ضعیف بودن اثر امپدانس مغناطیسی در مطالعات اولیه، این اثر از اهمیت به‌سزایی برخوردار نبود اما با مشاهده اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ در سیم کبالت پایه توسط پانینا^۵ و موهری در سال ۱۹۹۴ توجه 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، 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،

¹ Heisenberg

² Landau

³ Harrison

⁴ Makhotkin

⁵ Pania

بیشینه‌ی 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. اخیراً ساختارهای جدیدی که شامل هسته رسانای غیر مغناطیسی و پوسته فرومغناطیس است، مورد توجه قرار گرفته است. در این ساختارهای ناهمگون شار مغناطیسی حاصل از عبور جریان، از پوسته مغناطیسی گذشته و مجموعه پاسخ امپدانس خوبی از خود نشان می‌دهد. در این میان میکروتیوب‌های مغناطیسی نیکل-آهن اثر MI بالاتری از خود نشان می‌دهند و ازین‌رو تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی ساخت و بهبود آن‌ها صورت گرفت. امپدانس مغناطیسی بزرگ (GMI) نخستین بار در نوارها و سیم‌های آمورف مغناطیسی نرم مشاهده شد.

اثر نامتقارنی امپدانس مغناطیسی^۱ بزرگ (AGMI) ابتدا توسط کیتو^۲ برای سیم‌های آمورف کبالت پایه بررسی شد. سپس گونجی^۳ و ماخنوفسکی^۴ روش‌های دیگری از تولید شاخصه‌های نامتقارنی گزارش دادند.

AGMI سپس در سال ۱۹۹۹ میلادی توسط ماچادو^۵ در سیم‌های آمورف بازپخت شده در هوا مشاهده شد.

¹ Asymmetric magnetoimpedance

² Kitoh

³ Gunji

⁴ Makhnovskiy

⁵ Machado

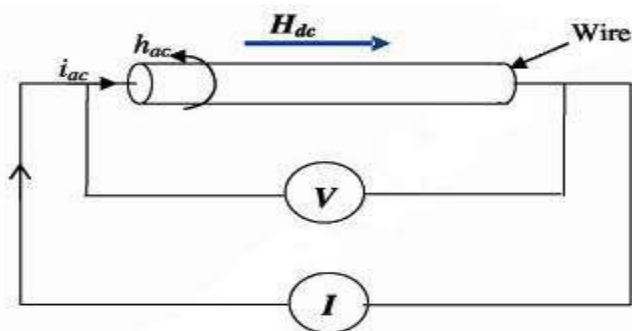
۲-۱ امپدانس مغناطیسی

کشف اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ در سیم‌ها و فیلم‌های آمورف و نانو ساختار مغناطیسی نرم افق جدیدی را در ساخت حسگر های مغناطیسی با دقت نانوتسلا گشوده است [۱،۲]

اگر یک نمونه سیم یا نوار از یک آلیاژ آمورف را تحت یک جریان متناوب (I_{ac}) با فرکانس به اندازه کافی بالامطابق شکل (۱-۱) قرار دهیم، با توجه به رابطه عمق پوسته^۱

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1-1)$$

(که در آن ρ مقاومت ویژه رسانا^۲، μ نفوذپذیری مغناطیسی^۳ و $\omega = 2\pi f$ است.) با افزایش ω عمق پوسته کاهش می‌یابد؛ در نتیجه اثرات سطحی مغناطش مهم می‌شوند و ولتاژ القایی در طول سیم نسبت به میدان طولی یکنواخت خارجی بسیار حساس می‌شود.



شکل (۱-۱): شمائی از روش اندازه گیری امپدانس مغناطیسی. (میدان القائی ناشی از جریان می باشد [۴].)

امپدانس مختلط نمونه خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(\omega) = U_{ac}/I_{ac} = R + iX \quad (2-1)$$

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 دوسر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی خارجی باعث تغییر امپدانس $Z = R + iX$ در مواد نرم مغناطیسی می‌شود. در رابطه، R

¹ Skin depth

² Resistivity

³ Magnetic permeability

مقاومت^۱ و X رئاکتانس^۲ نمونه است [۲]. 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:

$$\frac{\Delta Z}{Z} (\%) = \left\{ \frac{|Z(H)| - |Z(H_{\max})|}{|Z(H_{\max})|} \right\} \times 100 \quad (3-1)$$

که در آن، $|Z|$ اندازه امپدانس ($|Z|=R^2+X^2$) و H_{\max} مقدار بیشینه میدان خارجی اعمال شده به نمونه است [۳]. باید توجه کنیم که:

۱- تعریف (۳-۱) 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} نیست و اگر I_{ac} هارمونیک باشد U_{ac} هارمونیک نیست. 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. یکی از مهم‌ترین خصوصیت‌هایی که حسگرها باید داشته باشند، خطی بودن رفتار آنها نسبت به میدان اعمالی است. اگرچه امپدانس مغناطیسی نسبت به میدان مغناطیسی در حالت کلی رفتار خطی از خود نشان نمی‌دهد، اما در امپدانس مغناطیسی نامتقارن و در میدان‌های بسیار پایین، می‌توان ناحیه‌ای که رفتار سیستم خطی است را برای کار انتخاب کرد.

این رفتار در اطراف نقطه‌ی صفر به دلیل وجود ناهمسانگردی نامتقارن القایی قابل مشاهده است [۱]. در حین اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی یک نوار یا سیم مغناطیسی می‌توان با عبور یک جریان یکنواخت dc از ماده این ناهمسانگردی نامتقارن را ایجاد کرد [۲]. حوزه‌ها در راستای خاصی جهت‌گیری می‌کنند، بنابراین رفتار حوزه‌ها و ماده در پاسخ به میدان خارجی H_{ex} نامتقارن می‌شود و ولتاژ ac دو سر نمونه نسبت به میدان‌های خارجی H_{ex} مثبت و منفی، پاسخ یکسانی نخواهد داشت.

¹ Resistance

² Reactance

³ Giant MagnetoImpedance

۲- اگر چه رابطه $\frac{\Delta Z}{Z}$ به عنوان تعریف امپدانس مغناطیسی بزرگ، ممکن است برای مشخص کردن تغییرات GMI مفید باشد، اما برای فیزیکدانان چندان مفید نخواهد بود. حتی اگر چنین بستگی خطی نسبت به Z وجود داشته باشد و بتوان آن را به طور ساده محاسبه کرد، باز هم چندین دلیل برای تغییر این تعریف وجود دارد:

الف): اطلاعات در مورد جابجایی فاز کم است.

ب): امپدانس مغناطیسی 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).

ج): نسبت $\frac{\Delta Z}{Z}$ به این که چه اندازه از جریان، در $Z(H_{max})$ وارد می شود، نسبتاً حساس

است. از این دیدگاه، تعریف نسبت $\frac{Z}{R_{dc}}$ (مقاومت dc نمونه است) به عنوان نسبت GMI شاید مناسب تر باشد [۵].

افزایش نسبت مشخصه GMI به معنای حساسیت بیشتر ماده نسبت به میدان خارجی است، با اعمال روش های خاصی می توان این نسبت مشخصه را افزایش داد [۱،۲]. یکی از این روش ها حرارت دادن نمونه در شرایط خلأ است.

۳-۱ اثر پوسته در فلزات

می دانیم که جریان ac از سطح رسانا به صورت همگن عبور نمی کند و بیشتر روی سطح نمونه متمرکز می شود. این پدیده را اثر پوسته می نامند. اثر پوسته در بازه ی وسیعی از فرکانس جریان عبوری منشأ اثر امپدانس مغناطیسی است [۲].

اثر پوسته در رساناهای فلزی از سال ها قبل به وسیله الکترو دینامیک کلاسیک شرح داده شده است. و بیان می کند که جریان ac با فرکانس f ، به طور یکنواخت در تمامی سطح مقطع رسانا شارش نمی یابد بلکه در پوسته ای نزدیک به سطح رسانا محدود می شود (شکل (۱-۲)). با اعمال یک میدان مغناطیسی dc خارجی، تغییراتی در نفوذ پذیری مغناطیسی مؤثر ایجاد