١٠٢٤٢٤

دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

امپدانس مغناطیسی آلیاژهای آمورف نانو ساختار مغناطیسی نرم پایه‌آهن در گستره ۱ مگاهرتز تا ۴ گیگاهرتز

۱۳۸۷/۱/۲۶

دانشجو:

محمد هادی خاکساران

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی طهرانچی

استاد مشاور:

دکتر مجید قناعت شعار

شهریور ۱۳۸۶

۱۰۲۴۲۴

دانشگاه شهید بهشتی

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

بسمه تعالی

« صورتجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۲۰۰/۱۸۸۰/ت/د مورخ ۸۶/۶/۱۷ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه آقای محمد هادی خاکساران به شماره شناسنامه ۳۴۸۴ صادره از قزوین متولد ۱۳۶۰ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فوتونیک

با عنوان: " امپدانس مغناطیسی آلیاژهای آمورف نانو ساختار مغناطیسی نرم پایه آهن در گستره ۱ مگاهرتز تا ۴ گیگاهرتز"

به راهنمایی: دکتر طهرانچی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۶/۶/۱۷ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۹/۰ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر طهرانچی

۲-استاد مشاور: دکتر قناعت شعار

۳- استاد داور: دکتر توسلی

۱۳۸۷/۱/۲۱

۴- استاد داور : دکتر فیض آبادی

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر مهاجرانی

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای محترمم آقای دکتر طهرانچی که در انجام این پایانامه از حمایت‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان بهره‌مند بوده‌ام قدردانی نمایم.
از آقایان دکتر قناعت شعار بواسطه مشاوره‌های سودمند شان، دکتر توسلی و دکتر قمی بواسطه رهنمایی‌ها و کمک‌های مفیدشان کمال تشکر را دارم.
از همه دانشجویان و دوستانم در آزمایشگاه مگنتواپتیک بالاخص آقای احمد خیاط جعفری، آقای مجید محسنی ،آقای وحید فلاحی، خانم حمیدی آقای مهرداد مرادی، خانم دهقان، آقای سروش شباهنگ، آقای حمید افتخاری، وسایر دوستان و دانشجویان در پژوهشکده لیزر و پلاسما بخصوص آقایان سید ایمان حیسنی و محمد رضا رضایی، خانم نواب، آقای اسماعیل حیدری، خانم محزون ، آقای فرزاد فریدونی و... که هریک به نوعی در اجرای این پروژه مرا یاری دادند صمیمانه تشکر می‌نمایم.

بسمه تعالی

تاریخ .....
شماره .....
پیوست .....

چکیـــده پایان نـــامه / رساله

لطفاً تایپ شود

نام و نام خانوادگی دانشجو : محمد هادی خاکساران

عنوان پایان نامه :

امپدانس مغناطیسی آلیاژهای آمورف نانو ساختار مغناطیسی نرم پایه‌آهن در گستره ۱ مگاهرتز تا ۴ گیگاهرتز

استاد راهنما: دکتر محمد مهدی طهرانچی

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فوتونیک **گرایش:** مواد فوتونیکی

محل تحصیل (دانشگاه): شهید بهشتی

پژوهشکده: لیزر **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۱۳۸۵/۶/۱۷ **تعداد صفحات:** ۱۰۳

کلید واژه‌ها: (واژه‌هائی که بیانگر موضوع‌های پایان نامه است)

امپدانس مغناطیسی، تشدید فرومغناطیس ، آلیاژهای نانوبلوری مغناطیسی ، فرکانس میکروموج.

چکیده: (حداکثر دو صفحه)

تحقیقات بر روی خاصیت امپدانس بزرگ مغناطیسی (GMI) در آلیاژهای مغناطیسی در ساختارهای نانو، نسل جدیدی از حسگرهای مغناطیسی را در پیش روی ماقرار داده است. آلیاژهای نرم مغناطیسی علاوه بر خواص مورد توجه در فاز آمورف،

در فاز نانوبلورین نیز بعلت داشتن خواص مغناطیسی متفاوت، مورد توجه محققان هستند. این خواص شامل اشباع مغناطیسی بالا، ناهمسانگردی مغناطیسی کم، میدان وادارندگی مغناطیسی کم و نفوذپذیری مغناطیسی بالا هستند، که همگی می‌توانند امپدانس مغناطیسی آنها را بهبود دهند. امپدانس مغناطیسی در گستره میکروموج و فرکانس رادیویی اطلاعات بسیار مفیدی از خواص فیزیکی مواد مذکور، جهت ساخت حسگر در اختیار قرار دهد. از آنجا که قوانین اهمیک و روش‌های اندازه‌گیری مدارهای فرکانس پائین قابل استفاده در سیستم‌های میکروموج نمی باشد، ابتدا چیدمانی مناسب برای اندازه‌گیری امپدانس سیمها و نوارهای آمورف و نانوساختار، در گستره فرکانسی رادیویی و میکرموج راه‌اندازی شد، سپس با ساخت کوره خلاء و بازپخت مناسب نمونه‌ها توسط آن اثر ایجاد نانو ساختار در پاسخ امپدانسی و درنتیجه در تشدید فرومغناطیسی، میدان اشباع و مغناطش‌اشباع آلیاژ مذکور، مطالعه شد که از نتایج بدست آمده می‌توان در ساخت و طراحی هسته حسگر مغناطیسی با فرکانس کاری بالا استفاده نمود.

عنوان | شماره صفحه

فهرست مطالب

فصل اول: اثر امپدانس مغناطیسی ۱

۱-۱: مقدمه ۲

۱-۲: معرفی اثر امپدانس مغناطیسی ۴

۱-۳: تاریخچه ۵

۱-۳-۱: امپدانس مغناطیسی درگسترهٔ میکروموج ۶

۱-۳-۲: آلیاژهای مغناطیسی نرم نانوساختار آهن پایه ۸

۱-۴: کاربردها ۹

۱-۴-۱: حسگر میدان مغناطیسی ۹

۱-۴-۲: کاربردهای مبتنی بر اندازه‌گیری میدان در حسگر جریان و جابجائی ۱۰

۱-۴-۳: کاربرد حسگر فشار- امپدانس ۱۱

۱-۴-۴: **کاربرد در ناحیه فرکانس رادیویی و میکروموج** ۱۱

فصل دوم: عوامل مؤثر بر امپدانس مغناطیسی ۱۳

۲-۱: مبانی نظری امپدانس مغناطیسی ۱۴

۲-۲: عوامل تأثیر گذار بر امپدانس مغناطیسی ۱۸

۲-۲-۱: فرکانس جریان ورودی متناوب ۱۹

عنوان | شماره صفحه

۲-۲-۱-۱: ناحیه فرکانسی پائین ۱۹

۲-۲-۱-۲: ناحیه فرکانسی میانه ۱۹

۲-۲-۱-۳: ناحیه فرکانسی بالا ۲۰

۲-۲-۱-۴: ناحیه فرکانسی بسیار بالا ۲۰

۲-۳-۱: تشدید فرومغناطیسی ۲۶

۲-۳-۱-۲: توصیف تئوری ۲۸

۲-۳-۱-۳: میدان موثر ۳۳

۲-۳-۱-۳-۱:میدان وامغناطش ۳۳

۲-۳-۱-۳-۲:تشدید در فیلم نازک و سیم فرومغناطیس ۳٤

۲-۳-۱-۳-۳:میدان ناشی از ناهمسانگردی مغناطیسی ۳٦

۲-۳-۱-۳-٤: میدان ناشی از برهمکنش تبادلی ۳٦

فصل سوم: آلیاژهای نانو ساختار مغناطیسی آهن پایه ۳۷

۳-۱: آلیاژهای نانو کریستالی مغناطیسی نرم ۳۸

۳-۱-۱: آلیاژهای شامل Fe - TM - Cu -Si- B ۳۹

۳-۱-۲: آلیاژها ی شامل Fe –T M- Cu - B ۳۹

۳-۱-۳: آلیاژهای شامل Fe –Co - TM- (Cu) B ۴۰

عنوان | شماره صفحه

۳-۱-۴: آلیاژهای دیگر ۴۰

۳-۲: هندسه‌های مختلف از آلیاژهای مغناطیسی نرم ۴۱

۳-۲-۱: نوارها ۴۱

۳-۲-۲: سیم‌ها ۴۲

۳-۲-۳: میکروسیمها ۴۲

۳-۲-۴: لایه های نازک و چند لایه ها ۴۲

۳-۳: خواص مغناطیسی و ساختاری آلیاژهای مغناطیسی آهن پایه ۴۳

۳-۳-۱: روند نانوکریستالی شدن و تحولات ساختاری ۴۴

۳-۳-۲: رفتار مغناطیسی ۴۷

۳-۳-۳: اثر امپدانس مغناطیسی در آلیاژهای مغناطیسی نرم آهن پایه بازپخت شده با کوره ۴۹

فصل چهارم: نظریه خط انتقال ۵۲

۴-۱: :مقدمه ۵۳

۴-۲: امپدانس کل وپارامترهای پراکندگی ۵۵

۴-۳: تعیین امپدانس مشخصه ۵۷

۴-۴: مدلسازی امپدانس مشخصه ۶۱

۴-۵: محاسبهٔ روابط ۶۳

عنوان | شماره صفحه

فصل پنجم: : روش تجربی و نتایج ۶۶

۵-۱: :چیدمان اندازه گیری فرکانس بالا ۶۷

۵-۲: مشخصه‌یابی خاتمه سلول ۷۱

۵-۳: پردازش داده‌ها ۷۲

۵-۴: سیم پیچ مولد میدان مغناطیسی ۷۴

۵-۵: بازپخت حرارتی ۷۷

۵-۶: نتایج ۸۰

۵-۷: بحث و نتیجه‌گیری ۹۷

پیشنهاد برای ادمه کار: ۱۰۰

منابع و مراجع ۱۰۱

فصل اول:

اثر امپدانس مغناطیسی

۱-۱: مقدمه

توسعهٔ نوارها، سیم‌ها ومیکروسیم‌های نرم‌آمورف مغناطیسی وکشف امپدانس بزرگ مغناطیسی درآن‌ها، منجر به انقلابی در مطالعه و استخراج خواص مغناطیسی آنها درگسترهٔ فرکانس‌هایی ازحدود 100kHz تا 10GHz گشته است. این فعالیت‌ها هم ناشی از کنجکاوی وعلاقهٔ عملی وهم بخاطر کاربردهای مواد مذکور درساخت حسگر میدان مغناطیسی بوده است. درحالیکه بیشتر مطالعات انجام شده درفرکانس‌های MHz و زیر آن بوده است، به رفتار متفاوت امپدانس مغناطیسی در فرکانسهای بالا (تا حد چند گیگا هرتز)، توجه برخی از محققان را در چند سال اخیر به این بازه فرکانسی معطوف کرده است [۱-۵].

در فرکانسهای بالا، طول موج با ابعاد نمونه مورد اندازه‌گیری قابل مقایسه شده و در نتیجه روش اندازه‌گیری ولتاژ-جریان برای محاسبه امپدانس کاربرد ندارد. در این بازه فرکانسی تنها با در نظر گرفتن نظریه خط انتقال[1] قادر به اندازه‌گیری تغییرات امپدانس نمونه خواهیم بود.

از طرفی آلیاژهای مغناطیسی پایه‌آهن فاینمت علاوه بر خواص مورد توجه در فاز آمورف، در فاز نانوبلورین نیز بعلت داشتن خواص مغناطیسی متفاوت مورد توجه محققان هستند. این خواص شامل اشباع مغناطیسی بالا، ناهمسانگردی مغناطیسی کم، میدان وادارندگی مغناطیسی کم و تراوایی مغناطیسی بالا هستند، که

[1] Transmission Line Theory

همگی می‌توانند امپدانس مغناطیسی را بهبود دهند. در این شرایط امپدانس مغناطیسی در گستره میکروموج و فرکانس رادیویی اطلاعات بسیار مفیدی از خواص فیزیکی مواد مذکور، بدست می دهد.

بطور کلی تحقیق در حوزه امپدانس مغناطیسی[1] بر اساس سه دیدگاه اساسی زیر انجام می‌شود:

۱- نظری: از دیدگاه نظری، تحقیق در امپدانس مغناطیسی با بسط مدل‌های پدیده شناختی برای درک چندین جنبه اساسی، مثل وابستگی به میدان و فرکانس که در داده‌های آزمایشی وجود دارند، شروع می‌شود. سپس تحقیق در امپدانس مغناطیسی با توصیف دقیقی که بر اساس رابطه نزدیک بین امپدانس مغناطیسی و تشدید فرومغناطیسی[2] وجود دارد، کامل می‌شود. بعد از سازگاری ساختار هندسی و شرایط مرزی، ممکن است که توصیف دقیق‌تری از پدیده داشته باشیم. این امر، افق کاملا جدیدی را در مطالعه امپدانس مغناطیسی بازمی‌کند که البته با پیچیدگیهای خاص ریاضی همراه است.

۲- ابزار اضافی برای بررسی مواد مغناطیسی نرم: فهم عمیقتر سازوکار پدیده امپدانس مغناطیسی، اجازه می‌دهد تا بتوان به پیشگوئی برخی از رفتارهای مورد انتظار که در شرایط خاص به وجود می‌آید، پرداخت. با استفاده از امپدانس مغناطیسی به عنوان یک ابزار اضافی، می‌توان به بررسی برخی از قوانین ذاتی و غیر ذاتی مواد مغناطیسی که به طور مصنوعی رشد داده شده‌اند، پرداخت.

۳- کاربرد: مشاهده امپدانس مغناطیسی در سیم، نوار ، فیلم‌های نازک و میکروسیم‌ها با روکش شیشه‌ای[3]، و با ساختارهای مختلف (آلیاژهای آمورف، مواد نانو بلوری[4] و تک بلور[5])، که هر کدام خواص ویژه‌ای را به نمایش می‌گذارند، چندین کاربرد عملی، بعنوان حسگر میدان، به همراه داشته است. بعضی از آنها اخیرا ساخته شده و در آزمایشگاه به ثبت رسیده‌اند و بعضی دیگر نیز در بازار موجود هستند.

---

[1] Magneto Impedance (MI)
[2] Ferromagnetic resonance
[3] Glass-covered microwires
[4] Nanocrystalline materials
[5] Single crystal

۱-۲: معرفی اثر امپدانس مغناطیسی

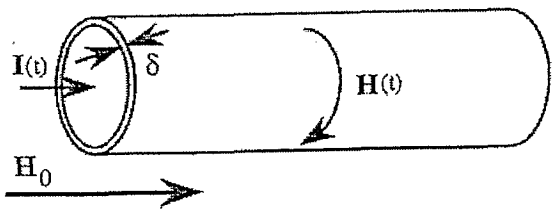
پدیده امپدانس مغناطیسی شامل تغییرات امپدانس الکتریکی،Z ، مواد مغناطیسی نرم است، وقتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی ایستا (ثابت) یا تحت فشار یا تنش مکانیکی قرار می‌گیرند[۶]. چنانچه سهم این تغییرات زیاد باشد، این پدیده به عنوان اثر امپدانس بزرگ مغناطیسی (GMI) شناخته می‌شود و نسبت آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta Z}{Z}(\%) = \left\{ \frac{|Z(H)| - |Z(H_{\max})|}{|Z(H_{\max})|} \right\} \times 100 \qquad (۱-۱)$$

که $|Z|$ اندازه امپدانس $H_{\max}$ مقدار میدانی است که در آن امپدانس ماده اشباع می‌شود. به‌عنوان مثال، نسبت امپدانس مغناطیسی ماکزیمم میکروسیمی با فرکانس جریان متناوب یک مگاهرتز و میدان ماکزیمم چند ده اورستد در حدود ۶۰۰٪ گزارش شده‌است [۷].

مشخصه عمومی موادی که اندازه‌گیری امپدانس بر روی آنها انجام می‌شود، رفتار مغناطیسی نرم آن‌ها، وقتی در راستای دایروی و یا عرضی مغناطیده می‌شوند، است. مبدا و سرچشمه اثر امپدانس مغناطیسی، تغییرات کنترل شده عمق پوسته[1] است. اثر پوسته[2] اثری است که از سالها قبل به وسیله الکترودینامیک کلاسیک برای رساناهای فلزی شرح داده شده است. به واسطه این اثر، یک جریان متناوب با فرکانس بالا 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 تراوایی مغناطیسی و $\omega=2\pi f$). لذا می‌توان از امپدانس بعنوان یک مقاومت ناشی از توزیع جریان در ماده تعبیر کرد. با توجه به رابطه عمق پوسته با فرکانس، افزایش فرکانس عمق پوسته‌ای که جریان در آن توزیع پیدا کرده است را کاهش می‌دهد، درنتیجه جریان در یک سطح مقطع کمتری توزیع پیدا می‌کند و مقاومت یا امپدانس ماده افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر بعلت وجود

[1] Skin depth
[2] Skin effect



شکل(۱-۱): نمائی کلی از اثر پوسته در یک نمونه فرومغناطیس [۸]

توزیع غیر یکنواخت جریان، ماده رفتار سلفی از خود نشان می‌دهد [۷]. در مواد غیرمغناطیسی که تراوایی مغناطیسی آنها ناچیز است، معمولا اثر پوسته در فرکانسهای بالا (چند گیگاهرتز) رخ می‌دهد. در ماده‌ای که تراوایی مغناطیسی آن بالا است (مثل مواد مغناطیسی نرم نانوساختار)، اثر پوسته می‌تواند در فرکانسهای چند کیلوهرتز رخ دهد و امپدانس زیادی از خود نشان دهد. از طرفی چون تراوایی مغناطیسی خود تابعی از میدان مغناطیسی و خواص دیگر از جمله دما و تنش در ماده است، این عوامل عمق پوسته را تحت تأثیر قرار داده و امپدانس ماده نیز تغییر می‌کند. این وابستگی امپدانس به تراوایی مغناطیسی و در نهایت به میدان مغناطیسی باعث کشف پدیده امپدانس مغناطیسی در مواد مغناطیسی نرم گردید.

۱-۳: تاریخچه

گزارش‌های اولیه در مورد آنچه امروزه به عنوان اثر امپدانس مغناطیسی شناخته می‌شود، به قدمت کارهای بنیادی است که توسط هایزنبرگ[1] و لاندؤ[2] در مواد مغناطیسی، مطرح شد [۸، ۹].

هریسون[3] در سال ۱۹۳۵ میلادی اولین گزارش را در مورد امپدانس مغناطیسی ارائه داد [۸، ۹]. تعبیر واقعی اثر امپدانس مغناطیسی با مفهوم اثر پوسته که توسط هریسون مطرح شده بود، مجددا در سال ۱۹۹۴ میلادی

[1] Heisenberg
[2] Landau
[3] Harrison

به طور همزمان توسط پانینا[1] و مهری[2] و همچنین بیچ[3] و برکوویتز[4] بیان شد. در سال ۱۹۹۶ اولین گزارش درمورد امپدانس مغناطیسی مواد آمورف در گستره میکروموج توسط یلون و همکارانش منتشر شد.

۱-۳-۱: امپدانس مغناطیسی درگسترهٔ میکروموج

ازسال ۱۹۴۰ روش استاندارد تعیین خواص مغناطیسی درگسترهٔ فرکانسی GHz اندازه‌گیری تشدید فرومغناطیسی بوده است، بدین ترتیب که نمونه داخل یک کاواک تشدید با ضریب کیفیت،Q ، بالا قرارداده می‌شود، توان جذب شده توسط نمونه ضریب کیفیت Q راکاهش داده، فرکانس تشدید را تغییر می‌دهد، بطوریکه توان جذبی بصورت تابعی از میدان اعمالی قابل اندازه‌گیری است. توان جذب شده و جابجایی فرکانس به ترتیب متناسب با قسمت حقیقی و موهومی امپدانس سطحی می‌باشند. تاکنون این روش بصورت گسترده‌ای تافرکانس‌های 140GHz بکار رفته است. لیکن از دومشکل رنج می‌برد:

۱- کاواک فقط اندازه‌گیری دریک فرکانس رافراهم می‌کند ۲- تعیین دقیق توان جذب شده بسیار مشکل است[۱۲].

درسال ۱۹۹۶ آقای یلون[5] وهمکارانش نشان داد که امپدانس حجمی Z توسط یک ضریب ساده هندسی به امپدانس سطحی مرتبط می‌شود. بطوریکه اندازه‌گیری امپدانس Z را معادل اندازه‌گیری تشدید فرومغناطیسی می‌سازد[۱].روش تجربی انجام آزمایش توسط یلون درگسترهٔ GHz درسال ۱۹۹۷ ارائه شد [۲]. روش تجربی نسبتا مشابهی نیز در سال ۱۹۹۸ توسط آقای برونتی[6] وهمکارنش ارائه شد که در کار خود اثر طول نمونه و حالت تشدیدی هندسی ناشی از طول بلند نمونه مطالعه کردند[۳]. او و همکارانش در سال ۲۰۰۲

[1] Panina
[2] Mohri
[3] Beach
[4] Berkowitz
[5] A. Yelon
[6] L. Brunetti

روش خود را با اندازه‌گیری امپدانس مشخصه خط انتقال حاوی نمونه مغناطیسی کامل کردند[۴] که روش مذکور مبنای اجرای این پایانامه می باشد. در همه این روش ها نمونه جزئی از داخل یک خط انتقال فرکانس بالا می‌شود و با اندازه‌گیری ضرایب انعکاس وعبور از این خط انتقال، خواص مورد نظر قابل تعیین هستند. این امر مستلزم آن است که به منظور پرهیز از اثرات تشدید ناشی از ابعاد هندسی سیستم، نمونه به اندازهٔ کافی کوچک (کوچکتر از ربع طول موج) باشد (برعکس سیستم تشدید فرومغناطیس). واین شرط ماکزیمم فرکانس کاری اندازه‌گیری را تعیین می‌کند.

در سال ۲۰۰۵ خانم مریم حشمت زاده و همکارانش روش متفاوتی را ارائه دادند. در روش آن‌ها ابتدا ثابت مختلط انتشار γ از داده های تجربی استخراج شده، سپس با مدلسازی شرایط هندسی خط انتقال حاوی نمونه و محاسبات عددی پارامترهای خط انتقال، امپدانس نمونه و همچنین تراوایی مغناطیسی آن تحت میدان‌های مغناطیسی خارجی مختلف استخراج می شوند[۵].

درمقایسه با تشدید فرومغناطیس وبرخلاف آن روش امپدانس مغناطیسی این مزیت را دارد که در زیر فرکانس ماکزیمم همهٔ میدان‌ها وفرکانس‌ها با آزمایش یکسانی قابل بررسی و اندازه‌گیری‌اند.

از دیگر کارهای انجام شده در زمینه امپدانس مغناطیسی فرکانس بالا می‌توان به گزارش ولنزوءلا[۱] و مونتیل[۲] در دو سه سال اخیر تحت عنوان "*ارتباط بین امپدانس مغناطیسی وجذب میکروموج در نمونه های کبالت پایه، تحت میدانهای ضعیف*" اشاره کرد که هنوز مدل نظری مستحکمی برای نتایج کار آن‌ها ارائه نشده است.

[۱] R. Valenzuela
[۲] H. Montiel

۱-۳-۲: آلیاژهای مغناطیسی نرم آهن پایه

اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی اولین بار در ساختارهای تک‌فاز آمورف و سه‌بعدی مثل سیمها و نوارهای آمورف مغناطیسی نرم انجام شد. نتایج این بررسی ها نشان داد که مواد مغناطیسی نرمتر، پاسخ دهنده بهتری برای امپدانس مغناطیسی هستند، بنابربین تحقیق بر روی ساختارهای نانوکریستالی فرومغناطیسی نرم شروع شد و اخیراً مواد نانوکریستال برای استفاده در صنعت بطور فراوان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۳]. در سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ چند تن از دانشمندان برای اولین بار آلیاژهایی از این نوع در حالت نانو ساختند و توانستند نتایج مربوط به خواص مغناطیسی نرم را برای این مواد گزارش کنند. این خواص شامل اشباع مغناطیسی بالا ،ناهمسانگردی مغناطیسی کم، ضریب مگنتوتنگش نزدیک به صفر ($\lambda \approx ۱۰^{-۷}$)، تراوایی مغناطیسی بالا ($\mu \approx ۱۰^{۵}$) و میدان وادارندگی مغناطیسی کم ($H_c < ۱$ A/m) هستند [۱۳]. معمولاً کلمه نانوکریستال برای موادی بکار می‌رود که ابعاد دانه‌های تشکیل دهنده آنها بین ۱ تا ۵۰ نانومتر باشد. ماده آهن پایه فاینمت در سال ۱۹۸۸ توسط ژاپنی‌ها کشف شد [۱۴]. پس از پیشنهاد ساختار ماده جدید فاینمت تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفت. مواد آهن پایه در کلاسهای مشابه نیز پس از آن زمان کشف شد [۱۴]. مواد نانوساختار آهن پایه معمولاً به علت داشتن سطح پسماند مغناطیسی کوچک دارای اتلاف پائین هستند و در صورت کاربرد آنها بصورت نوارهای مغناطیسی نازک جریانهای اتلافی بسیار کمی از آنها عبور می‌کند. برخی از آنها پس از تولید که معمولاً بصورت آمورف هستند قابلیت کاربرد دارند ولی برخی از آنها پس از تولید باید تغییر ساختار داشته باشند تا به خواص مغناطیسی ایده‌آل و مورد نظر برسند. تغییر ساختار در این مواد با استفاده از حرارت دادن نمونه‌ها می‌باشد. حرارت دادن نمونه‌ها در کوره خلأ یا در حضور یک گاز بی‌اثر مثل آرگون یا نئون می‌باشد. عملیات حرارتی می‌تواند توسط کوره، پخت جریانی و لیزری انجام شود. تحت فرآیند حرارتی نمونه‌ها تغییر ساختار داده و می‌توان به یکسری مواد مغناطیسی فوق نرم در فاز نانوساختار دسترسی پیدا کرد.

۱-۴: کاربردها

اگرچه امپدانس مغناطیسی از ۷۰ سال گذشته شناخته شده است، اما در دهه اخیر به طور جدی و کاربردی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است و روز به روز از لحاظ نظری و تجربی به تکامل می‌رسد.مباحث کاربردی برای حسگرهایی که بر مبنای امپدانس مغناطیسی کار می‌کنند، بسیار گسترده هستند [۱۵،۱۶]. از جمله می‌توان به کاربرد این حسگرها در صنعت اتومبیل، اندازه‌گیریهای صنعتی و خودکار، کامپیوتر و تکنولوژی اطلاعات، بیومغناطیس، حسگرهای محیطی، نیرو و انرژی الکترونیکی، ایمنی و سلامت و اندازه‌گیریهای علمی و آکادمیک اشاره کرد. در ادامه به کاربردهای انواع مختلفی از حسگرها پرداخته می‌شود.

۱-۴-۱: حسگر میدان مغناطیسی

بیشترین تحقیقات، برای کاربردی شدن امپدانس مغناطیسی به عنوان حسگر، توسط گروهی با رهبری پروفسور مهری در ناگویای ژاپن [۱۵،۱۶] در حال انجام است. اغلب کاربرد این حسگر در تکنولوژی، میکروحسگرهایی است که امپدانس آنها تحت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند.

حسگرهای با ابعاد کوچک در حد میکرون، برای کنترل سیستم‌ها در دنیا متقاضی فراوانی دارند. اینگونه حسگرها در فرکانس‌های چند مگاهرتز با حساسیت میدان حدود کمتر از ۱ اورستد و بیشترین حساسیت ۱ نانوتسلا قابلیت پاسخگویی دارند. در جدول (۱-۱) نیز چند نمونه حسگر موجود، مورد بررسی قرار گرفته است.

گسترش ساختار مواد سیمی شکل، به علت اینکه زودتر مورد توجه قرار گرفت، بیشتر بود اما امروزه توجه زیادی به ساختار فیلم نیز جلب شده است. زیرا می‌توان با تکنولوژی ساخت لایه (معمولا لیتوگرافی) و ساخت مدار مجتمع روی فیلم، یک حسگر همراه با مدار مورد نیاز آن تهیه کرد. تاکنون دو نوع ساختار از

جدول (۱-۱): مقایسه چند نوع حسگر مغناطیسی معروف و قابل استفاده در دنیا [۱۰]

Sensor Principle	Head Length (m)	Resolution / Full scale (Am^{-1})	Response speed (Hz)	Power consumption (W)
Hall	$10 \sim 100\times10^{-6}$	40/± 80	10^{6}	10^{-2}
Magnetoresistance (MR)	$10 \sim 100\times10^{-6}$	$8/\pm8\times10^{3}$	10^{6}	10^{-2}
Giant Magnetoresistance (GMR)	$10 \sim 100\times10^{-6}$	$.8/\pm1.6\times10^{3}$	10^{6}	10^{-2}
Fluxgate	$10 \sim 20\times10^{-3}$	$8\times10^{-5}/\pm2.4\times10^{2}$	5×10^{3}	1
SQUID	$10 \sim 20\times10^{-3}$	$50\times10^{-12}/\pm1\times10^{2}$	5×10^{3}	–
Magnetoimpedance	$1 \sim 2\times10^{-3}$	$8\times10^{-5}/\pm2.4\times10^{2}$	10^{6}	5×10^{-3}
Stress impedance	$1 \sim 2\times10^{-3}$	0.1 Gal/30 Gal	10^{4}	5×10^{-3}

فیلم مورد بررسی قرار گرفته است. تک‌لایه‌ایها و ساختارهای ساندویچ‌گونه (چند لایه‌ای مشابه یا متفاوت از نظر مواد) [۱۷]. در هر دو حالت، ساخت ماده به روش کندوپاش بوده و روش ساخت، متفاوت با سیم یا نوار و ضخامت در حد چند میکرون است.

۱-٤-۲: کاربردهای مبتنی بر اندازه‌گیری میدان در حسگر جریان و جابجایی

تحلیل‌های غیرمخرب[1]

حسگرهای زیادی بر پایه امپدانس مغناطیسی برای کاربردهای ویژه، طراحی شده‌اند. یک نمونه از آن، حسگر جریان است که بر مبنای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده توسط جریان عبوری طراحی شده است. این حسگر در ابتدا توسط گروهی طراحی شد که توانستند میدان اطراف یک لایه را که حامل جریان بود، با پیچاندن سیم (به عنوان حسگر) حول آن لایه، اندازه‌گیری کنند. خانواده‌های متفاوتی از حسگرهای

[1] Non-destructive analysis