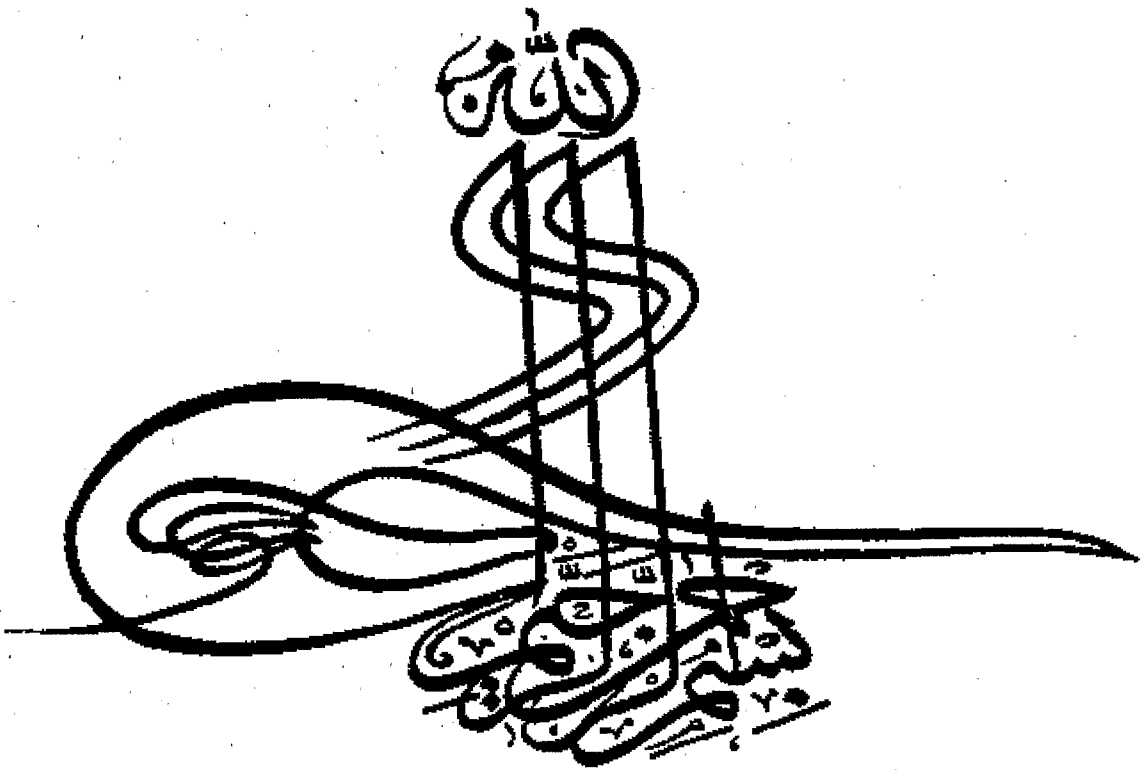


۱۷۷۱۰۵۹۴۹
۱۷۷۱۰۱۲۲



۱۰۷۹۴۷



دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

مطالعه نقش پردازش لیزری با آهنگ تکرار پالس متغیر در ایجاد تغییرات

مغناطیسی و ساختاری در سطح و تأثیر آن بر پاسخ امپدانس

نوارهای آمورف کبالت پایه CoFeSiB

دانشجو:

نجمه نبی پور

استاد راهنما:

دکتر مجید قناعت شعار

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی طهرانچی

شهریور ماه ۱۳۸۶

۱۰۷۹۴۶



دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ
شماره
پیوسته

بسمه تعالی

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین

تلفن: ۲۹۹۰۱

«صورتجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۱۸۸۴/۲۰۰/ت/د مورخ ۸۶/۶/۱۷ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه
حاجم نجمه نبی پور به شماره شناسنامه ۷۱۸ صادره از دزفول متولد ۱۳۶۰ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد
نایب رسته رشته فوتونیک

با عنوان: "مطالعه نقش پردازش لیزری با آهنگ تکرار پالس متغیر در ایجاد تغییرات مغناطیسی و ساختاری
در سطح و تاثیر آن بر پاسخ امپدانس نواریهای آمورف کبالت پایه $CoFeSiB$ "

به راهنمایی: دکتر قناعت شعار

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۶/۶/۱۷ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوران و با عنایت به ماده ۲۰ آئین
نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۹.۵ و درجه عالی... مورد تصویب
قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر قناعت شعار

۲- استاد مشاور: دکتر طهرانچی

۳- استاد داور: دکتر توسلی

۴- استاد داور: دکتر فیض آبادی

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر لیکانام



تقدیم به

مادر مهربانم که پیشرفت من آرزوی اوست و دعایش پشتوانه من است

و

خواهر عزیزم که همواره مشوق و سنگ صبورم بوده است

و

یکایک اعضای خانواده‌ام که دلگرمی من از آنهاست.

به نام آرام دلها

ای قادری که خدائی را سزایی و ای احدی که در ذات و صفات بی‌همتایی، به عزت و جلال خود و به عظمت و جمال خود که جان ما را صفای خود ده و دل ما را هوای خود ده و چشم ما را ضیاء خود ده و ما را از روی رحمت آن ده که آن به. الهی نظر خود بر ما مدام کن و ما را بر داشته خود نام کن.

سپاس و ستایش بیکران شایسته ذات خدایی است که سعادت بیش اندیشی را به من ارزانی داشت و با استعانت از او این موفقیت حاصل شد. بی‌شک حمایت‌های بی‌شائبه خانواده‌ام که همواره موجب دلگرمی و مشوق من در این راه بوده، سهم بزرگی در به ثمر رسیدن تلاشهای ذهنی و فکری و کوششهای علمی‌ام داشته است، سپاس بی‌پایان خود را تقدیم یکایکشان می‌کنم. شایسته است از جناب آقای دکتر مجید قناعت شعار در مقام استاد راهنما، که بر بنده منت نهاده و با سعه صدر و ایجاد انگیزه در نواندیشی در به ثمر رسیدن این پروژه نهایت همراهی و همفکری را نموده‌اند، تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم. از جناب آقای دکتر محمد مهدی طهرانچی در مقام استاد مشاور، که با انتقال تجربیات ارزنده در پیشبرد این پژوهش کمک شایانی کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. جا دارد از کلیه عزیزانی که در آزمایشگاه مگتوفوتونیک در زمینه بهره‌گیری از امکانات با اینجانب همکاری داشته‌اند، قدردانی نمایم. از خداوند منان توفیق روزافزون و اعتلای این مجموعه را در زمینه‌های گوناگون علمی و پژوهشی خواستارم.

چکیده

آلیاژهای آمورف فلزی دسته‌ای از مواد هستند که با ویژگی ساختار بدون نظم بلند برد و تقارن دوره‌ای شناخته می‌شوند. این آلیاژها در چند دهه اخیر جایگاه ویژه‌ای را در میان مواد فلزی به خود اختصاص داده‌اند. این اهمیت ناشی از خواص فیزیکی منحصر بفرد آنها و پتانسیل بالای این نوع مواد در کاربردهای صنعتی در زمینه‌های مختلف میکروالکترونیک و مهندسی الکترونیک است. پیش از هر چیز، این مواد می‌توانند به عنوان مواد مغناطیسی نرم و نیز پوشش‌های حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. برای استعمال این مواد در کاربردهای صنعتی و مهندسی، داشتن اطلاعات دقیق از رفتار سینتیک و تبلوری آنها ضروری است. فرآیند بازپخت نوارهای آمورف فلزی در دمایی پایین‌تر از دمای تبلور، منجر به تغییرات ساختاری برگشت‌ناپذیری در ماده می‌شود. این تغییرات ناشی از فرآیندهای واهلش ساختاری و در واقع تقابل بین دو نوع فرآیند است؛ فرآیند کاهش حجم آزاد، که آهنگ انتقال جرم پخشی را کاهش می‌دهد و دیگری، فرآیند نظم‌یابی که آلیاژ را به سمت حالت بلوری از طریق افزایش آمادگی آن برای تبلور سوق می‌دهد. این دو فرآیند منجر به تغییر در بسیاری از خواص فیزیکی ماده می‌شوند.

اخیراً اثر امپدانس مغناطیسی در آلیاژهای آمورف، توجه پژوهشگران و صنعتگران بسیاری را به خود معطوف کرده است. اهمیت این اثر به دلیل کاربردهای آن در ثبت اطلاعات و استفاده از آن به عنوان حسگر مغناطیسی است. اثر امپدانس مغناطیسی عبارتست از تغییر قسمت‌های موهومی و حقیقی امپدانس یک نمونه مغناطیسی که در یک میدان مغناطیسی ایستا قرار گرفته است. امپدانس مغناطیسی به عوامل متعددی همچون پیکربندی حوزه‌های مغناطیسی، میزان سنجاق‌شدگی آنها، ناهمسانگردی، تنش و غیره وابسته است و از اینرو اثر امپدانس مغناطیسی می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای مطالعه خواص مغناطیسی مواد بکار رود. نظر به اینکه اثر امپدانس مغناطیسی با اثر پوسته توصیف می‌شود و عمق پوسته در ناحیه فرکانسهای میانی ($< 20 \text{ MHz}$) از مرتبه چند ده تا چند صد نانومتر است، تولید نانو بلورکهای سطحی و تغییر مورفولوژی در لایه‌های سطحی با ضخامت نانومتری، می‌تواند بر پاسخ امپدانس نمونه تأثیرگذار باشد.

در سالهای اخیر مطالعه اثر امپدانس مغناطیسی آلیاژهای با ترکیب چهارتایی Co-Fe-Si-B و نقش فرآیند تبلور در آنها جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. فرآیندهای تبلوری در نوارهای آمورف کبالت پایه پس از بازپخت حرارتی، مورد مطالعه بسیاری قرار گرفته؛ اما فرآیندهایی که حین بازپخت لیزری اتفاق می‌افتند، هنوز بطور کامل درک نشده‌اند. بازپخت لیزری نقش مهمی در شکل‌گیری نانو بلورکها در آلیاژهای آمورف کبالت پایه داشته و تغییراتی را در خواص فیزیکی آنها پدید می‌آورد. لازم به ذکر است که تغییر پارامترهای مختلف لیزر اثرات متفاوتی را در پی دارد. از جمله این پارامترها که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته، آهنگ تکرار پالس است.

در این رساله به منظور بررسی خواص ترابرد نوارهای مغناطیسی آمورف $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ، پاسخ امپدانس آنها پس از بازپخت لیزری، با ثابت نگهداشتن تعداد پالس دریافتی به جهت بررسی نقش آهنگ تکرار پالس مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که بازپخت لیزری در آهنگ تکرار پالس متفاوت منجر به رفتارهای متفاوتی در پاسخ امپدانس نمونه‌ها از نقطه نظر بیشینه پاسخ، رفتار قله‌ها، مد مغناطش غالب در نمونه، نامتقارنی ظاهر شده در پاسخ و نیز

حساسیت میدانی می‌شود. همچنین، بازپخت لیزری با تعداد پالس متفاوت در یک آهنگ تکرار خاص، نتایج متفاوتی را در پاسخ امپدانسی نشان می‌دهد. در ادامه، نقش پردازش لیزری در حضور میدان مغناطیسی ضعیف طولی با ثابت نگهداشتن مدت زمان تابش در آهنگ تکرار پالس متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از القای قله دیگری در نمودار پاسخ امپدانسی در نتیجه القای ناهمسانگردی پس از بازپخت لیزری-میدانی و نیز افزایش ضریب نامتقارنی پاسخ است. بعلاوه، تغییر بیشینه پاسخ و نیز حساسیت میدانی پس از بازپخت لیزری-میدانی دیده می‌شود.

تصاویر بدست آمده به کمک میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌ها نشان از شکل‌گیری بلورکهایی در سطح دارد. اطلاعات حاصله از EDX حضور مقادیر قابل ملاحظه‌ای اکسیژن در لایه سطحی در نمونه‌های پردازش شده را تأیید کرده و تغییر درصد اتمی عناصر تشکیل‌دهنده ساختار ماده را بیان می‌کند. رفتار حوزه‌های مغناطیسی با تغییر مورفولوژی ایجاد شده در سطح پس از پردازش لیزری به کمک میکروسکوپی نیروی مغناطیسی (MFM) بررسی شد. از این تصاویر، تأثیرپذیری شکل حوزه‌ها، ابعاد آنها و مغناطش حوزه از توپوگرافی سطح نمونه نتیجه می‌شود. میزان تأثیرپذیری ساختار حوزه از این ناهمواریها به مشخصه‌های ناهمواری وابسته است. از سوی دیگر، علاوه بر اثر ناهمواریها بر حوزه‌ها و القای ناهمسانگردیهای تک محوری و یا توزیعی در آن و نیز در مواقعی گیراندازی ممان‌های مغناطیسی به سبب وضعیت خاص مورفولوژی، ناهمسانگردیهایی حاصل از شکل ناهمواریها نیز در نمونه القا می‌شود. مطالعه تغییرات ساختاری القا شده در سطح به علت پردازش لیزری به کمک میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) و با دو هدف صورت گرفت: توپوگرافی سطح و فاز سطح. دقت در تصاویر AFM این نکته را روشن می‌سازد که علاوه بر گرمای حاصل از تابش پالسهای لیزری، عامل دیگری در آفرینش ناهمواریهای سطحی مؤثر است. این عامل می‌تواند ضربه ناشی از برخورد پالس به سطح باشد. بعلاوه، تصاویر AFM وجود بلورکهای سطحی متنوعی در ابعاد و اشکال و تراکم متفاوت را در نمونه‌های بازپخت شده مختلف تأیید می‌کند و بر گذار از حالت آمورف به بلوری و بالعکس صحنه می‌گذارد. بر اساس نتایج بدست آمده از این رساله می‌توان عوامل نقش‌آفرین در تغییر مورفولوژی را پیدایش بلورکهای سطحی و نیز قدرت ضربه پالس برخورد کننده به لایه مذاب سطحی دانست. متغیر بودن آهنگ سرد و گرم شدن‌های متوالی در نمونه‌های مختلف به علت بازپخت در آهنگ تکرار پالس متفاوت، از یک سو سبب شکل‌گیری بلورکهایی با جنس، شکل و اندازه گوناگون در سطح می‌شود؛ و از سوی دیگر می‌تواند با انتخاب فاز در بین مؤلفه‌های بلوری مختلف در سیستم منجر به القای ساختار آمورف گردد. نتایج این رساله نشان می‌دهد که از یک سو، وجود بلورکهای سطحی با مشخصه‌های متنوع در نمونه‌ها، که در نتیجه اکسید شدن سطح و حرارت شکل گرفته‌اند، و از سوی دیگر، ناهمسانگردیهای مغناطیسی و ناهمسانگردیهای ساختاری ناشی از تغییر مورفولوژی و به تبع آن تغییر در رفتار حوزه‌های مغناطیسی، منجر به نمودارهای گوناگونی در پاسخ امپدانسی می‌شوند. این تحولات قادرند حساسیت میدانی پاسخ امپدانسی و خواص نرم مغناطیسی ماده را تغییر دهند.

کلید واژه‌ها: امپدانس مغناطیسی، مواد آمورف، پردازش لیزری، ساختار حوزه‌های مغناطیسی، مورفولوژی.

فهرست جداول

جدول ۱-۳: اطلاعات مربوط به نقش پراش نوار $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{28}\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$ (*۳۳)

جدول ۲-۳: اطلاعات مربوط به نقش پراش نوار $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{20}$ (۳۳)

جدول ۳-۳: اطلاعات مربوط به نقش پراش نوار $\text{Co}_{78}\text{Fe}_2\text{Mn}_2\text{Si}_9\text{B}_9$ (۳۳)

جدول ۴-۳: شدت نسبی خطوط R_{21} میدان مغناطیسی فوق ریز متوسط، میدان مغناطیسی فوق ریز میانگین، پهنای توزیع میدان مغناطیسی فوق ریز و سطح جذب کل در طیف مازبائر نمونه Metglas2605CO به صورت تابعی از تعداد پالسهای تابیده شده. (۴۶)

جدول ۵-۳: میدان مغناطیسی فوق ریز، شیفت ایزومر δ (نسبت به $\alpha\text{-Fe}$ در 300 K)، شکافتگی چهارقطبی، شدت نسبی خطوط R_{21} و مساحت نسبی متناظر با نقوش مؤلفه‌ها در طیف TMS و CEMS نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای 648 K به مدت 1 h و بازپخت با لیزر پالسی آگزایمر. (۴۸)

جدول ۶-۳: میدان مغناطیسی فوق ریز، شیفت ایزومر δ (نسبت به $\alpha\text{-Fe}$ در 300 K)، شکافتگی چهارقطبی، شدت نسبی خطوط R_{21} و مساحت نسبی متناظر با نقوش مؤلفه‌ها در طیف TMS و CEMS نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای 723 K به مدت 1 h و بازپخت با لیزر پالسی آگزایمر. (۵۲)

جدول ۱-۴: اندازه ناهمسانگردی، 2 H_K ، فرکانس واهلش و بازه تغییرات ضریب نامتقارنی نمونه‌های پردازش شده با تعداد ثابت پالس در آهنگ تکرار پالس مختلف. (۷۲ و ۷۳)

جدول ۲-۴: مقاومت الکتریکی و اندازه ناهمسانگردی، 2 H_K و فرکانس واهلش نمونه‌های پردازش شده در غیاب میدان و در حضور میدان طولی 3 Oe در آهنگ تکرار پالس 10 Hz ، 5 Hz و 1 Hz . (۸۱)

جدول ۳-۴: درصد اتمی عناصر بر روی سطح نمونه‌های مختلف (اطلاعات بدست آمده از EDX). (۸۷)

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نوار مغناطیسی حامل جریان با ضخامت $t=2a$ که حامل جریان متناوب است. (۶)
- شکل ۱-۲: تعریف امیدانس برای قطعه سیمی با سطح مقطع q . (۱۷)
- شکل ۲-۲: امیدانس نوار آمورف خام $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ در نقطه‌ای که امیدانس مغناطیسی به اشباع می‌رسد. (۲۱)
- شکل ۳-۲: قسمت حقیقی، موهومی، و اندازه امیدانس مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$. (۲۲)
- شکل ۱-۳: درجه تبلور χ به صورت تابعی از چگالی انرژی پالس لیزری فرودی (منحنی ۱- $Co_{78}Fe_2Mn_2Si_9B_9$ ؛ منحنی ۲- $Co_{72}Fe_8B_{20}$ و منحنی ۳- $Co_{50}Fe_{28}Si_{10}B_{12}$). (۳۱)
- شکل ۲-۳: تصاویر HREM و نقش پراش الکترونی نمونه $Co_{50}Fe_{28}Si_{10}B_{12}$ (a) بعد از بازپخت حرارتی در $350^\circ C$ به مدت یک ساعت و (b) پس از بازپخت لیزری در 50 mJ/cm^2 متناظر با همان دما. (۳۳ و ۳۴)
- شکل ۳-۳: تصاویر HREM و نقش پراش الکترونی نمونه $Co_{72}Fe_8B_{20}$ (a) بعد از بازپخت حرارتی در $350^\circ C$ به مدت یک ساعت و (b) پس از بازپخت لیزری در 50 mJ/cm^2 متناظر با همان دما. (۳۴ و ۳۵)
- شکل ۴-۳: تصاویر HREM و نقش پراش الکترونی نمونه $Co_{78}Fe_2Mn_2Si_9B_9$ (a) بعد از بازپخت حرارتی در $350^\circ C$ به مدت یک ساعت و (b) پس از بازپخت لیزری در 50 mJ/cm^2 متناظر با همان دما. (۳۵)
- شکل ۵-۳: نقش پراش پرتو X ؛ $Co_{50}Fe_{28}Si_{10}B_{12}$: (a) بازپخت گرمایی و (b) بازپخت لیزری؛ a: $\alpha-Co$, b: $\beta-Co$, c: $\alpha-Fe$, d: $(CoFe)_2B$, e: Co_2B , f: Co_3B . (۳۶)
- شکل ۶-۳: نقش پراش پرتو X ؛ $Co_{72}Fe_8B_{20}$: (a) بازپخت گرمایی و (b) بازپخت لیزری؛ a: $\alpha-Co$, b: $\beta-Co$, c: $\alpha-Fe$, d: $(CoFe)_2B$, e: Co_2B , f: Co_3B . (۳۷)
- شکل ۷-۳: نقش پراش پرتو X ؛ $Co_{78}Fe_2Mn_2Si_9B_9$: (a) بازپخت گرمایی و (b) بازپخت لیزری. (۳۸)
- شکل ۸-۳: طیف TMS نمونه‌های Metglas2605S3A در دمای اتاق: (a) در حالت خام و آمورف؛ و بعد از تابش لیزر پالسی اگزایمر ($\lambda=308 \text{ nm}$ ، $\tau=26 \text{ ns}$ و $t=5 \text{ s}$) با (b) 50 mJ/pulse در آهنگ تکرار 25 Hz ، (c) 50 mJ/pulse در آهنگ تکرار 50 Hz ، (d) 75 mJ/pulse در آهنگ تکرار 25 Hz و (e) 75 mJ/pulse در آهنگ تکرار 50 Hz . (۴۱)
- شکل ۹-۳: شدت نسبی خطوط دوم به اول طیف TMS به صورت تابعی از آهنگ تکرار بین پالسهای لیزر: (a) برای نمونه‌های Metglas2605CO، 2605 SM، 2826MB و 50 mJ/pulse و (b) برای نمونه‌های Metglas2605S3A در 50 mJ/pulse و 75 mJ/pulse . (۴۲)
- شکل ۱۰-۳: میدان مغناطیسی فوق ریز مؤلفه آمورف به صورت تابعی از آهنگ تکرار بین پالسهای لیزر اگزایمر: (a) برای نمونه‌های Metglas2605CO، 2605 SM، 2826MB و 50 mJ/pulse و (b) برای نمونه‌های Metglas2605S3A در 50 mJ/pulse و 75 mJ/pulse . انرژیهای پالسی متناظر با مقادیر تقریبی شاریدگی به ترتیب 20 mJ/mm^2 و 30 mJ/mm^2 است. (۴۲)
- شکل ۱۱-۳: تصویر (سمت راست) SEM ($\times 2000$) و (سمت چپ) EDX نمونه Metglas2605S3A با 75 mJ/pulse در آهنگ تکرار 50 Hz . (۴۳)
- شکل ۱۲-۳: طیف CEMS نمونه Metglas 2605S3A پس از بازپخت با پارامترهای تابشی 75 mJ/pulse و 50 Hz به مدت ۵ ثانیه. (۴۴)

شکل ۳-۱۳: طیف TMS نمونه‌های Metglas2605CO: (a) در نمونه خام در حالت آمورف و بعد از تابش لیزر آگرایمر (ns) $\tau=10$ ، $\lambda=308\text{ nm}$ و $\Phi_L=5\times 10^{18}\text{ photon/cm}^2$ در آهنگ تکرار ۱ Hz) با (b) ۲، (c) ۵ و (d) ۱۰ پالس در هر spot (۵۵).
شکل ۳-۱۴: طیف مازبائر نمونه‌های Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۶۴۸ K به مدت ۱ h و پس از آن تابش لیزر پالسی آگرایمر به منظور بازپخت لیزری: (a) طیف TMS نمونه‌ای که تنها بازپخت حرارتی شده، (b) طیف TMS نمونه‌ای که بازپخت حرارتی و بازپخت لیزری شده، (c) طیف CEMS نمونه‌ای که تنها بازپخت حرارتی شده و (d) طیف CEMS نمونه‌ای که بازپخت حرارتی و بازپخت لیزری شده است. (۴۷)

شکل ۳-۱۵: (a) تصویر SEM نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۶۴۸ K به مدت ۱ h؛ (b) تصویر SEM نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۶۴۸ K به مدت ۱ h و پس از آن بازپخت با لیزر آگرایمر (ns) $\tau=10$ ، $\lambda=308\text{ nm}$ و $\Phi_L=5\times 10^{18}\text{ photon/cm}^2$ در آهنگ تکرار ۱ Hz؛ (c) تحلیل EDX بلورکهای مشاهده شده در نمونه بازپخت شده با کوره. (۴۹)

شکل ۳-۱۶: طیف مازبائر در دمای اتاق نمونه‌های Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۷۲۳ K به مدت ۱ h و پس از آن تابش لیزر پالسی آگرایمر به منظور بازپخت لیزری: (a) طیف TMS نمونه‌ای که تنها بازپخت حرارتی شده، (b) طیف TMS نمونه‌ای که بازپخت حرارتی و بازپخت لیزری شده، (c) طیف CEMS نمونه‌ای که تنها بازپخت حرارتی شده و (d) طیف CEMS نمونه‌ای که بازپخت حرارتی و بازپخت لیزری شده است. (۵۱)

شکل ۳-۱۷: (a) تصویر SEM نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۷۲۳ K به مدت ۱ h؛ (b) تصویر SEM نمونه Metglas2605CO بعد از بازپخت حرارتی در دمای ۷۲۳ K به مدت ۱ h و پس از آن بازپخت با لیزر آگرایمر (ns) $\tau=10$ ، $\lambda=308\text{ nm}$ و $\Phi_L=5\times 10^{18}\text{ photon/cm}^2$ در آهنگ تکرار ۱ Hz. (۵۲)

شکل ۳-۱۸: سطح نمونه که با لیزر بازپخت شده است. تقارن درجه ۲ (سمت راست) و درجه ۴ (سمت چپ). (۵۴)

شکل ۳-۱۹: منحنی مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی نمونه‌های لیزر خورده، میدان مغناطیسی در راستای عمود و موازی با طول نمونه ۲۷۰۵. (۵۵)

شکل ۳-۲۰: منحنی مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی نمونه‌های لیزر خورده، میدان مغناطیسی در راستای عمود و موازی با طول نمونه ۲۶۰۵. (۵۵)

شکل ۳-۲۱: تصاویر بیتر برای نمونه (سمت چپ) با تنگش مثبت و (سمت راست) با تنگش منفی. (۵۶)

شکل ۳-۲۲: تصویر حفره ایجاد شده با لیزر. (۵۶)

شکل ۳-۲۳: امپدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی نمونه‌های کبالت پایه پس از بازپخت لیزری با انرژی‌های متفاوت در فرکانس ۱ مگا هرتز. (۵۷)

شکل ۳-۲۴: امپدانس بر حسب میدان در فرکانسهای متفاوت برای نمونه کبالت پایه لیزر خورده. (۵۷)

شکل ۳-۲۵: امپدانس نمونه‌های بازپخت لیزری کبالت پایه در فرکانس ۱۰ مگا هرتز. (۵۸)

شکل ۳-۲۶: ناهمسانگردی القا شده توسط بازپخت لیزری بر حسب انرژی لیزر. (۵۸)

شکل ۳-۲۷: وابستگی نفوذپذیری به میدان برای نمونه‌های آمورف و لیزری با انرژیهای متفاوت. (۵۹)

شکل ۳-۲۸: وابستگی مغناطش بر حسب دمای نمونه نیز در انرژیهای متفاوت بازپخت و نیز حالت آمورف در حضور میدان مغناطیسی به اندازه ۸۰۰ آمپر بر متر. (۵۹)

شکل ۴-۱: پاسخ امپدانسی نمونه‌های پردازش شده با تعداد ثابت ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار: (الف) ۱ Hz، (ب) ۵ Hz، (ج)

۲ Hz، (د) ۱۰ Hz، (ه) $10/8$ Hz، (و) $10/7$ Hz، (ز) $10/3$ Hz، (ح) $10/4$ Hz و (ط) نمونه خام در فرکانس ۵ MHz (۶۲)

شکل ۴-۲: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار ۱ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۳)

شکل ۴-۳: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار ۵ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۴)

شکل ۴-۴: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار ۲ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۵)

شکل ۴-۵: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار ۱۰ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۷)

شکل ۴-۶: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار $10/8$ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۸)

شکل ۴-۷: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار $10/7$ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۶۹)

شکل ۴-۸: منحنی تغییرات بیشینه پاسخ امپدانسی با آهنگ تکرار پالس لیزری در تعداد پالس ثابت. (۶۹)

شکل ۴-۹: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار $10/3$ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛ (ب)

بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۷۰)

شکل ۴-۱۰: (الف) رفتار پاسخ امپدانسی نمونه لیزرخورده با آهنگ تکرار $10/4$ Hz در فرکانس‌های ۱۰، ۱۵، ۵ MHz؛

(ب) بستگی فرکانسی بیشینه MI و (ج) حساسیت میدانی آن. (۷۱)

شکل ۴-۱۱: (الف) مقایسه رفتار پاسخ امپدانسی و (ب) پاسخ مغناطیسی نمونه‌های پردازش شده با آهنگ تکرار پالس

متفاوت با تعداد ثابت پالس دریافتی. (۷۲)

شکل ۴-۱۲: پاسخ امپدانسی نمونه‌های تابش دیده با آهنگ تکرار ۱۰ Hz با (الف) ۶۰۰۰ پالس دریافتی و (ب) ۳۰۰۰ پالس

در فرکانس‌های ۵ MHz، ۱۰ MHz و ۱۵ MHz. (۷۴)

شکل ۴-۱۳: بستگی فرکانسی (الف) بیشینه MI و (ب) حساسیت میدانی نمونه‌های پردازش شده با تعداد پالس متغیر در

آهنگ تکرار ۱۰ Hz. (۷۵)

شکل ۴-۱۴: (الف) پاسخ امپدانسی نمونه تابش دیده با ۳۰۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۵ Hz در فرکانس‌های ۵ MHz،

۱۰ MHz و ۱۵ MHz؛ (ب) مقایسه رفتار پاسخ امپدانسی این نمونه با نمونه‌ای که ۶۰۰ پالس در همان آهنگ تکرار دریافت کرده

است. (۷۶)

شکل ۴-۱۵: بستگی فرکانسی (الف) بیشینه MI و (ب) حساسیت میدانی نمونه‌های پردازش شده با تعداد پالس متغیر در

آهنگ تکرار ۵ Hz. (۷۷)

شکل ۴-۱۶: بستگی پاسخ امپدانسی در فرکانس ۵ MHz به آهنگ تکرار پالس برای نمونه‌های بازیخت شده (الف) در غیاب

میدان و (ب) در حضور میدان طولی ۳ Oe؛ به ترتیب از راست به چپ با آهنگ تکرار ۱۰ Hz، ۵ Hz و ۱ Hz. (۷۸)

شکل ۴-۱۷: بستگی فرکانسی بیشینه پاسخ امیدانسی در آهنگ تکرار پالس مختلف برای نمونه‌های بازیخت شده (الف) در غیاب میدان و (ب) در حضور میدان طولی 3 Oe (۷۹).

شکل ۴-۱۸: بستگی فرکانسی پاسخ مغناطیسی برای نمونه‌های بازیخت شده در غیاب میدان و در حضور میدان طولی 3 Oe در آهنگ تکرار پالس (الف) 10 Hz ، (ب) 5 Hz و (ج) 1 Hz (۸۰).

شکل ۴-۱۹: بستگی فرکانسی بیشینه پاسخ امیدانسی برای نمونه‌های بازیخت شده در غیاب میدان و در حضور میدان طولی 3 Oe در آهنگ تکرار پالس (الف) 10 Hz ، (ب) 5 Hz و (ج) 1 Hz (۸۰).

شکل ۴-۲۰: بستگی فرکانسی ضریب نامتقارنی پاسخ امیدانسی (۸۲).

شکل ۴-۲۱: نقش پراش پرتو X نمونه خام و نمونه‌های پردازش شده با آهنگ تکرار مختلف (۸۴).

شکل ۴-۲۲: تصاویر SEM سه نمونه (الف) خام، (ب) لیزرخورده با آهنگ تکرار 5 Hz و (ج) 10 Hz ، زمان پرازش هر نمونه 10 دقیقه بوده است (۸۵).

شکل ۴-۲۳: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح (در محلی غیر از محلی که تصویر حوزه‌ها [تصویر (الف)] گرفته شده) و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت (ج)؛ از قسمت میانی نمونه خام (۸۹).

شکل ۴-۲۴: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمت میانی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار $10/3 \text{ Hz}$ (۹۰).

شکل ۴-۲۵: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمتی انتهایی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار $10/3 \text{ Hz}$ (۹۱).

شکل ۴-۲۶: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمت میانی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار $10/8 \text{ Hz}$ (۹۳).

شکل ۴-۲۷: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمت میانی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار 2 Hz (۹۴).

شکل ۴-۲۸: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمت میانی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار 1 Hz (۹۵).

شکل ۴-۲۹: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح از قسمت میانی نمونه تابش دیده با 600 پالس در آهنگ تکرار 5 Hz (۹۶).

شکل ۴-۳۰: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح (در محلی غیر از محلی که تصویر حوزه‌ها [تصویر (الف)] گرفته شده) و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت (ج)؛ از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۳۰۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۰.۵ Hz (۹۷)

شکل ۴-۳۱: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح (در محلی غیر از محلی که تصویر حوزه‌ها [تصویر (الف)] گرفته شده) و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت (ج)؛ از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۱.۰ Hz (۹۸)

شکل ۴-۳۲: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۳۰۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۱.۰ Hz (۹۹)

شکل ۴-۳۳: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۱.۰ Hz (۱۰۰)

شکل ۴-۳۴: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار $10/7$ Hz (۱۰۱)

شکل ۴-۳۵: تصاویر (الف) ساختار حوزه‌های مغناطیسی، (ب) تغییر مغناطش در راستاهای نشان داده شده در تصویر حوزه‌ها، (ج) توپوگرافی دو بعدی سطح در محل حوزه‌ها و (د) توپوگرافی سه بعدی از سطح قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار $10/4$ Hz (۱۰۲)

شکل ۴-۳۶: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده در آهنگ تکرار ۱ Hz (۱۰۵)

شکل ۴-۳۷: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده در آهنگ تکرار $10/8$ Hz (۱۰۵)

شکل ۴-۳۸: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده در آهنگ تکرار $10/7$ Hz (۱۰۶)

شکل ۴-۳۹: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۲ Hz در سطح روبش شده با ابعاد 1×1 میکرومتر مربع و نیز تصاویر (ج) توپوگرافی و (د) فاز از قسمت میانی همین نمونه برای سطح با ابعاد 10×10 میکرومتر مربع (۱۰۷)

شکل ۴-۴۰: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده در آهنگ تکرار $10/4$ Hz (۱۰۸)

شکل ۴-۴۱: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده در آهنگ تکرار $10/3$ Hz (۱۱۰)

شکل ۴-۴۲: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۵ Hz در سطح روبش شده با ابعاد 1×1 میکرومتر مربع و نیز تصاویر (ج) توپوگرافی و (د) فاز از قسمت انتهایی همین نمونه (۱۱۱)

شکل ۴-۴۳: تصاویر (الف) توپوگرافی و (ب) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۶۰۰ پالس در آهنگ تکرار ۱۰ Hz و نیز تصاویر (ج) توپوگرافی و (د) فاز از قسمت میانی نمونه تابش دیده با ۳۰۰۰ پالس در آهنگ تکرار (۱۱۲)

فهرست مطالب

فصل اول: امیدانس مغناطیسی

- ۱-۱ مقدمه‌ای بر ترابرد مغناطیسی مواد..... ۱
- ۲-۱ امیدانس مغناطیسی..... ۴
- ۳-۱ شرایط لازم برای داشتن پاسخ امیدانسی..... ۸
- ۴-۱ رفتارهای مختلف پاسخ امیدانسی و دلایل ظهور این رفتارها..... ۹
- ۵-۱ اثرات نامتقارن در امیدانس مغناطیسی..... ۱۰
- ۶-۱ کاربردهای امیدانس مغناطیسی..... ۱۱
- ۷-۱ کاربرد مواد مغناطیسی نرم در اثر امیدانس مغناطیسی..... ۱۲
- ۱-۷-۱ آلیاژهای آمورف مغناطیسی..... ۱۳
- ۲-۷-۱ مواد مغناطیسی نانوبلورین..... ۱۵

فصل دوم: تئوری امیدانس مغناطیسی و وابستگی آن به پارامترهای فیزیکی در مواد کبالت پایه

- ۱-۲ تئوری امیدانس مغناطیسی..... ۱۷
- ۲-۲ پاسخ امیدانسی و وابستگی آن به پارامترهای فیزیکی..... ۲۱
- ۱-۲-۲ امیدانس مغناطیسی در نواحی فرکانسی متفاوت..... ۲۱
- ۲-۲-۲ امیدانس مغناطیسی و تنش مکانیکی..... ۲۶
- ۳-۲-۲ امیدانس مغناطیسی و وابستگی دمایی..... ۲۷

فصل سوم: اثر تابش لیزر در تولید نانوبلور و ایجاد تغییر در خواص مغناطیسی آلیاژهای مغناطیسی نرم

- ۱-۳ اثر تابش لیزر Nd:YAG بر فرآیند تبلور در آلیاژهای آمورف کبالت پایه..... ۳۰
- ۲-۳ القای ناهمسانگردی و تغییر فاز به علت پردازش با لیزر پالسی اگزایمر در آلیاژهای آمورف آهن پایه..... ۳۹
- ۳-۳ انتخاب فاز در گذار به حالت آمورف حین پردازش لیزری نمونه‌های آهن پایه بازپخت شده با حرارت کوره..... ۴۴
- ۴-۳ اثر بازپخت لیزری بر رفتار حوزه‌های مغناطیسی..... ۵۳
- ۵-۳ تغییر پاسخ امیدانسی با تغییر انرژی پالس لیزری در فرآیند بازپخت..... ۵۶
- ۶-۳ بررسی تغییرات تراوایی پس از بازپخت لیزری..... ۵۹

فصل چهارم: نتایج تجربی

- ۱-۴ بررسی تغییر آهنگ تکرار پالس لیزری پردازش کننده بر پاسخ امیدانسی نوار آمورف کبالت پایه..... ۶۱
- ۲-۴ نقش تعداد پالس پردازش کننده بر پاسخ امیدانسی نوار آمورف کبالت پایه..... ۷۳

۳-۴ نقش پردازش لیزری در حضور میدان مغناطیسی ضعیف طولی با ثابت نگهداشتن مدت زمان پردازش نوارهای آمورف	
کبالت پایه CoFeSiB	۷۸
۴-۴ بررسی تغییرات ساختاری به کمک نقش پراش پرتو X	۸۳
۵-۴ بررسی رفتار حوزه‌های مغناطیسی با تغییر مورفولوژی سطح به کمک میکروسکوپی نیروی مغناطیسی (MFM)	۸۸
۶-۴ مطالعه تغییرات ساختاری القا شده به سبب پردازش لیزری با آهنگ تکرار پالس متفاوت به کمک میکروسکوپی نیروی	
اتمی (AFM)	۱۰۴
نتیجه‌گیری	۱۱۳
پیشنهادات	۱۱۴
مراجع	۱۱۵
چکیده به انگلیسی	۱۱۸

فصل اول: امپدانس مغناطیسی

۱-۱ مقدمه‌ای بر ترابرد مغناطیسی مواد

خواص ترابرد مغناطیسی^۱ مواد که شامل مقاومت مغناطیسی^۲ و امپدانس مغناطیسی^۳ می‌باشد، همراه با پیشرفت روزافزون تکنولوژی در زمینه مغناطیس (توسعه ضبط مغناطیسی، ذخیره‌سازی و بازخوانی اطلاعات) مورد توجه قرار گرفتند. مقاومت مغناطیسی، تغییر مقاومت نمونه تحت اثر یک میدان مغناطیسی است که بررسی آن نیازمند مفاهیم کوانتومی بر پایه اسپین حاملها و برهم کنش آنها با مغناطش ناشی از مواد مغناطیسی است؛ در حالیکه اثر امپدانس مغناطیسی یک پدیده کلاسیکی است که بر پایه اصول و مفاهیم الکترودینامیک کلاسیک توصیف می‌شود. امپدانس مغناطیسی، تغییر امپدانس الکتریکی یک رسانای مغناطیسی تحت اثر یک میدان مغناطیسی خارجی ایستا، H_{dc} است زمانیکه، جریان الکتریکی متناوبی، $I = I_0 \exp(-i\omega t)$ ، با فرکانس بالا از آن عبور می‌کند. می‌دانیم عبور جریان یکنواخت از یک رسانا منجر به پراکندگی الکترونیهای حامل جریان در ماده شده و نسبت به عبور جریانهای متفاوت (افزایش تعداد و سرعت الکترونیهای حامل جریان)، اختلاف پتانسیلهای متفاوتی در ماده ایجاد می‌شود. با داشتن مقادیر مختلف جریان و اختلاف پتانسیلهای بدست آمده می‌توان نمودار آنها را رسم کرد. در صورت خطی بودن نمودار، پیروی نمونه از قانون اهم، $V=IR$ ، نتیجه گرفته می‌شود. در صورتیکه، جریان گذرا از ماده غیریکنواخت ولی متناوب باشد علاوه بر پراکندگی الکترونها مانند آنچه در جریان یکنواخت اتفاق می‌افتد، میدان مغناطیسی ایجاد شده در فضا در نتیجه تبدیل میدانهای الکتریکی به مغناطیسی، باعث ایجاد جریانهای

¹ Magnetotransport Properties

² MagnetoResistance

³ MagnetoImpedance

گردابی^۱ در فلز شده و عبور جریان از کل فلز را به ناحیه‌ای خاص در اطراف پوسته فلز محدود می‌کند که به آن اثر پوسته^۲ می‌گویند. می‌توان نشان داد که اثر امپدانس مغناطیسی به کمک مفهوم عمق پوسته کلاسیکی، $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_t}}$ ، که تابعی از فرکانس جریان عبوری از هادی، f ، مقاومت الکتریکی ویژه^۳، ρ ، و تراوایی مغناطیسی عرضی^۴، μ_t ، نمونه فرومغناطیس است، قابل توجه می‌باشد. پس دو پارامتر ρ و μ_t نقش مهمی در رفتار پاسخ امپدانس ایفا می‌کنند. با توجه به رابطه عمق پوسته، با افزایش فرکانس، عمق پوسته توزیع جریان کاهش یافته و در نتیجه جریان در یک سطح مقطع کمتر توزیع پیدا می‌کند، و از آنجا، مقاومت یا امپدانس نمونه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، به علت وجود توزیع غیریکنواخت جریان، ماده رفتار القاگری از خود نشان می‌دهد [۱]. لازم به توضیح است که توزیع جریان نه تنها تحت کنترل شکل جسم و فرکانس جریان است بلکه همچنین وابسته به مغناطش عرضی ناشی از H_{de} است. امپدانس مغناطیسی با فرکانس افزایش می‌یابد و در فرکانس‌هایی که اثر پوسته قوی است، به یک پیشینه می‌رسد، $\delta \ll a$ که a شعاع سیم یا ضخامت نوار و یا فیلم است) و سپس بر اثر کاهش تراوایی با میدان در فرکانس‌های خیلی بالا کاهش می‌یابد. در مواد غیرمغناطیسی که تراوایی مغناطیسی آنها ناچیز است، عمق پوسته به رسانندگی^۵ ماده و فرکانس جریان وابسته است و معمولاً اثر پوسته در فرکانس‌های بالا (چند گیگاهرتز) رخ می‌دهد. در ماده‌ای که تراوایی مغناطیسی آن بالا است (مثل مواد مغناطیسی نرم نانوساختار^۶)، اثر پوسته می‌تواند در فرکانس‌های چند کیلو هرتز رخ داده و پاسخ امپدانس بالایی به دلیل زیاد بودن مقدار تراوایی مغناطیسی از خود نشان دهد. از این رو، این علاقه‌مندی وجود دارد که رفتار پاسخ امپدانس مواد نامبرده را در فرکانس‌های پایین جستجو کنیم. از طرفی، چون تراوایی مغناطیسی خود تابعی از میدان مغناطیسی و خواص دیگری از جمله دما و تنش^۷ در ماده است، عمق پوسته را تحت تأثیر قرار داده و از آنجا امپدانس ماده نیز تغییر می‌کند. این وابستگی امپدانس به تراوایی مغناطیسی و در نهایت به میدان مغناطیسی باعث کشف پدیده امپدانس مغناطیسی^۸ (MI) در سال ۱۹۹۴ گردید [۲، ۳]. در ابتدا به علت ناشناخته بودن بودن فیزیک این پدیده، وجود امپدانس مغناطیسی را به مقاومت مغناطیسی ارتباط می‌دادند [۴]. انجام تحقیقات گسترده‌تر

¹ Eddy Current

² Skin Effect

³ Resistivity

⁴ Transverse Magnetic Permeability

⁵ Conductivity

⁶ Nano-structured magnetic materials

⁷ Stress

⁸ Magneto Impedance

مشخص کرد که تعبیر این پدیده به درکی عمیق از توصیف‌های میکرومغناطیسی مواد مغناطیسی نرم نیاز دارد که به نوبه خود به دینامیک مغناطیسی وابسته است. با رشد سریع گروه‌های تحقیقاتی که به مطالعه امیدانس مغناطیسی بزرگ و کاربردهای تکنولوژیکی آن می‌پرداختند، این پدیده به طور واقعی، یک شاخه جدید از تحقیقات را که تلفیقی از میکرومغناطیس مگنت‌های نرم با الکترومغناطیس کلاسیک بود، گشود. پژوهش‌های وسیعتر محققان بر روی خواص میکرومغناطیسی مواد ارائه راه‌حلهای جدید برای فیزیک این پدیده فرصتهای تحقیقاتی زیادی را در این زمینه ایجاد کرده است.

گزارشهای گروههای پانینا^۱ [۳] و بیچ^۲ [۵] در اوایل دهه ۹۰ آغازگر پژوهشهای بسیاری در زمینه اثر امیدانس مغناطیسی بود. آنها مطالعه خود را در سیمهای فرومغناطیس آمورف FeCoSiB انجام دادند. گزارشات نشان از تغییر شدید امیدانس مغناطیسی با اعمال میدانهای مغناطیسی کوچک و در فرکانسهای نسبتاً پایین داشت. پس از آنها گروه ماچادو^۳ [۶] مقدار کوچکتري از این اثر را در فیلم نازک $Fe_{4.6}Co_{70.4}Si_{15}B_{15}$ و گروه بیچ [۲] در نوارها مشاهده و گزارش کردند. اما تغییر شدید در امیدانس مغناطیسی با اعمال میدانهای مغناطیسی کوچک (در حدود چند اورستد) و در فرکانسهای نسبتاً پایین (چند ده مگاهرتز) که می‌تواند در بعضی شرایط به مقادیری بالاتر از ۸۰٪ برسد، امیدانس مغناطیسی بزرگ^۴ (GMI) می‌باشد. امروزه با جستجو در منابع موجود می‌توان به کاربردی شدن این پدیده برای مطالعه مواد و صنعت پی‌برد [۷]. با توجه به گستردگی اطلاعاتی که اندازه‌گیری این پدیده در مواد مغناطیسی به دست می‌دهد، می‌توان در کنار برخی اندازه‌گیریهای دیگر به آنالیز مواد پرداخت [۸]. مواد مورد استفاده برای تحقیق در امیدانس مغناطیسی شامل نوارها، سیم‌ها^۵ و لایه‌های نازک^۶ متشکل از مواد مغناطیسی نرم هستند. این مواد پس از ساخت معمولاً در حالت آمورف بوده و می‌توان با برخی پروسه‌های بازپخت^۸ خواص ساختاری و مغناطیسی آنها را جهت نیازهای کاربردی، تغییر داد.

^۱ Panina

^۲ Beach

^۳ Machado

^۴ Giant MagnetoImpedance

^۵ Ribbons

^۶ Wires

^۷ Thin Films

^۸ Annealing Process

۲-۱ امیدانس مغناطیسی

برای اندازه‌گیری امیدانس مغناطیسی، از داخل نمونه جریان متناوب با دامنه ثابت عبور می‌دهند. نمونه بطور همزمان در داخل میدان مغناطیسی محوری قرار می‌گیرد. بدین منظور نمونه در راستای محور سیم پیچ تولید کننده میدان قرار داده می‌شود. با توجه به اینکه جریان عبوری (به شرط آنکه از ناحیه رفتار خطی خارج نشود) از نمونه از قانون اهم پیروی می‌کند، به کمک $Z=V/I$ می‌توان امیدانس مغناطیسی نمونه را بدست آورد. وقتی تغییرات امیدانس با میدان خارجی زیاد باشد، این پدیده به عنوان امیدانس مغناطیسی بزرگ شناخته می‌شود و در حالت کلی نسبت این تغییرات به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

که در آن، $|Z|$ اندازه امیدانس ($|Z|^2 = R^2 + X^2$) و H_{\max} مقدار بیشینه میدان خارجی اعمال شده به نمونه است. در رابطه اندازه امیدانس، R مقاومت^۱ و X رئاکتانس^۲ نمونه است. حساسیت^۳ MI به میدان مغناطیسی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$(\% (A/m)^{-1}) = \{ [\frac{\Delta Z}{Z} (\%)]_{\max} \} / HWHM \quad (2-1)$$

که در آن $HWHM$ ^۴ نصف پهنا در نصف بیشینه است. در واقع منحنی MI ممکن است حساسیت‌های متفاوتی برای بازه‌های میدانی مختلف از خود نشان دهد؛ پس تعریف حساسیت MI در یک بازه میدانی خاص به صورت تغییر نسبت MI در واحد میدان خواهد بود. این حساسیت به سادگی با نگاه به رفتار تراوایی μ_i نسبت به H_{dc} ، در حالیکه فرکانس تغییر می‌کند، بیان می‌شود [۹]. انتظار می‌رود تغییر شدیدی در μ_i حوالی $H_{dc} \sim 0$ را شاهد باشیم؛ که عموماً در فرکانس‌های پایین، $\delta > a$ ، اتفاق می‌افتد. در فرکانس‌های بالاتر، این حساسیت کم شده و یا به سمت H_{dc} بالاتر می‌رود. از این اثر می‌توان در شناسایی میدان‌های مغناطیسی کوچک استفاده کرد. کاربرد MI از شناسایی و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ضعیف (همانند نوک

¹ Resistance

² Reactance

³ Field Sensitivity

⁴ Half Width at Half Maximum

مغناطیسی ثبتگر) تا میدانهای مغناطیسی حفاظتی گسترده شده است. کاربردی بودن MI در حفاظ مغناطیسی به علت دارا بودن نرمی مغناطیسی و تراوایی بالای مورد نیاز در آنها است.

امپدانس مغناطیسی بزرگ به پارامترهای گوناگونی وابسته است که برای مطالعه آن توجه به این پارامترها ضروری است. برخی از این پارامترها عبارتند از ساختار مغناطیسی، ترکیب‌بندی شیمیایی^۱، ویژگیهای هندسی و مورفولوژی مواد مغناطیسی مورد کاربرد، دامنه و فرکانس جریان متناوب عبوری از نمونه، خواص مغناطیسی نمونه اعم از پذیرفتاری مغناطیسی^۲، میدان وادارندگی^۳، ساختار حوزه‌ها^۴ و ناهمسانگردی مغناطیسی^۵ و غیره است. مناسب‌ترین مواد برای کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی، مواد مغناطیسی نرم همچون آلیاژهای آمورف و مواد مغناطیسی نانوبلورین هستند که از این میان مواد نانوبلورین بهترین گزینه‌اند. برای دستیابی به مواد با ساختار نانوبلورین روشهای گوناگونی وجود دارد که بازپخت آلیاژ آمورف به صورت گوناگون از جمله آنهاست؛ هرکدام از روشهای بازپخت دارای مزایای منحصری فردی است. اگرچه آلیاژهای آمورف خام (بازپخت نشده) خود کاندید مناسبی برای بررسی اثر امپدانس مغناطیسی هستند؛ با بازپخت می‌توان خواص مغناطیسی این آلیاژها را اصلاح کرده، نرمی و تراوایی مغناطیسی آنها را افزایش، تنگش مغناطیسی^۶ و میدان وادارندگی را کاهش داده و در آنها ساختار نانو و ناهمسانگردی مغناطیسی القا کرد.

مواد کاربردی در اثر امپدانس مغناطیسی که دارای خاصیت مغناطیسی نرم هستند، قابل ساخت به شکلهای مختلف از جمله سیم (با قطری در حدود چند میلیمتر)، میکروسیم (با قطری در حدود چند میکرومتر)، نوارها، سیم‌های فلزی (معمولاً فلزات غیرمغناطیس) لایه نشانی شده بوسیله مواد مغناطیسی، چند لایه‌ایها و فیلمهای نازک و غیره می‌باشد. اثر امپدانس مغناطیسی به طور چشمگیری به شکل هندسی مواد، ترکیب‌بندی آنها و ... وابسته است.

حال اگر بخواهیم رابطه امپدانس را با پارامترهای ماده بدانیم، باید توزیع جریان را در بخشی از نمونه مورد بررسی قرار دهیم. زمانیکه فرکانس جریان متناوب افزایش می‌یابد، به علت اثر پوسته، جریان تمایل دارد که از نواحی نزدیک به سطح عبور نماید. حل دقیق مسئله عموماً وابسته به شکل رسانا و جریان عبوری است و برای بدست آوردن جواب، معادلات ماکسول و

¹ Chemical Composition

² Magnetic Susceptibility

³ Coercivity Field

⁴ Magnetic Domain Structure

⁵ Magnetic Anisotropy

⁶ Magnetostriction