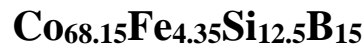


تأثیر دمای بازپخت و پهنای نوار بر امپدانس مغناطیسی در آلیاژ آمورف

حاجی علی، محمدرضا^{۱،۲}؛ روزمه، احسان^۱؛ حاجی زاده، ایمان^۲؛ محسنی، سید مجید^۲^۱ گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

اثر امپدانس مغناطیسی (MI) در نوارهای آلیاژ آمورف $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ که به روش انجماد سریع تهیه می‌شود، مشاهده شده است. در این مقاله، اثر بازپخت کوره‌ای در هوا، بر امپدانس مغناطیسی نوارهای آمورف با دو پهنای متفاوت در دماهای مختلف بررسی شد. بیشترین درصد MI برای نوار آمورف با پهنای ۰/۸۱ mm، ۱۲۰٪ در دمای ۳۸۰ °C و برای نوار آمورف با پهنای ۴/۹۳ mm، ۸۰٪ در همان دما مشاهده شد که نشانگر تأثیر مثبت کاهش پهنای نمونه بر اثر امپدانس مغناطیسی در راستای ساخت اسباب حسگری است.

Influence of temperature annealing and width of ribbon on the magnetoimpedance in $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous alloyHajiali, Mohammadreza^{1,2}; Roozmeh, Ehsan¹; Hajizadeh, Iman²; Mohseni, Seyed Majid²¹ Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan² Faculty of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

Magnetoimpedance (MI) effect has been observed in amorphous alloy $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ribbons prepared by rapid quenching technique. In this paper, the influence of annealing in air, on magnetoimpedance effect in amorphous ribbons by various width and temperatures are investigated. The maximum MI ratio of about 120% for sample width 0.81 mm and 80 % for sample width 4.93 mm obtained, for annealing temperature of 380 c and 60 minutes for both ribbons. MI characterization improvement conveys a pathway for application of such materials for magnetic sensors.

PACS No. 75.

کم انرژی، دقت بالا و قیمت ارزان مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱]. امپدانس مغناطیسی (MI) شامل تغییر امپدانس الکتریکی کل یک رسانای مغناطیسی (معمولاً رسانای فرومغناطیس) تحت اعمال یک میدان یکنواخت خارجی H_{ext} است، وقتی یک جریان متناوب $I = I_0 e^{i\omega t}$ به اندازه I_0 و فرکانس f از نمونه عبور کند. این جریان طبق قانون آمپر یک میدان مغناطیسی القایی عرضی تولید می‌کند [۲]. اثر MI یک پدیده‌ی الکترومغناطیسی کلاسیکی است که

مقدمه

امروزه حسگرهای مغناطیسی نقش مهمی در تجهیزات صنعتی و پزشکی پیدا کرده‌اند. انواع مختلفی از این حسگرها مانند حسگرهای القایی، اثر هال، مگنتوایپتیک، مقاومت مغناطیسی و امپدانس مغناطیسی وجود دارند که در بین آنها حسگر امپدانس مغناطیسی به خاطر داشتن مزایایی از قبیل اندازه‌ی کوچک، حساسیت بالا، مصرف

دماهای مختلف ۲۵۰، ۳۵۰، ۳۸۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در محیط هوا بازپخت شده‌اند. برای اندازه‌گیری درصد امپدانس مغناطیسی، یک میدان مغناطیسی خارجی ایستا در راستای طولی نمونه اعمال می‌شود. این میدان خارجی در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰۸ Oe توسط یک سیملوله تولید می‌شود. جریان متناوب و فرکانس اعمالی به نمونه توسط دستگاه مولد جریان متناوب مدل SFG-830 تولید می‌شود. با انتخاب دامنه‌ی ولتاژ ۰/۴ mv بر روی دستگاه مولد، جریان متناوب در طول آزمایش ۸ mA از نمونه عبور داده می‌شود. محدوده‌ی فرکانس برای اندازه‌گیری MI بین ۱۰۰ KHz تا ۱۰ MHz می‌باشد که فرکانس بهینه ۴ MHz انتخاب شده است. اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی از طریق ولتاژ به وسیله‌ی اسیلوسکوپ مدل GDS-2064 انجام می‌شود. تغییرات بدست آمده در ولتاژ خروجی در اسیلوسکوپ را ثبت کرده و سپس با توجه به رابطه‌ی زیر درصد امپدانس مغناطیسی بدست آورده می‌شود:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \left\{ \frac{Z(H) - Z(H_{\max})}{Z(H_{\max})} \right\} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن $Z(H)$ امپدانس اندازه‌گیری شده در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و $Z(H_{\max})$ امپدانس اندازه‌گیری شده در میدان مغناطیسی اشباع است. میدان مغناطیسی اشباع، ماکزیمم میدانی است که از این میدان بالاتر تغییر شدیدی در امپدانس بر اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت رخ نمی‌دهد، یعنی حدی که مغناطش با اعمال میدان بزرگتر تغییر نکند. [۶].

بحث و نتیجه‌گیری:

رفتار مواد مغناطیسی نرم و پاسخ امپدانس‌ی آلیاژهای آمورف، می‌تواند با بازپخت مناسب بهبود یابد. در برخی موارد در فرایند ساخت این مواد تبدیل به بس بلور می‌شوند که در آن صورت بازدهی خود را از دست خواهند داد، بنابراین در گام اول از نمونه‌های تهیه شده پراش پرتو X گرفته شد، تا از آمورف بودن آن‌ها اطمینان حاصل شود. شکل (۱-الف) نقش پراش پرتو X نمونه‌های خام آمورف کبالت پایه با پهنای ۰/۸۱ و ۴/۹۳ میلیمتر را نشان می‌دهد. عدم وجود قله تیز و وجود قله پهن در زاویه ۴۴/۵

در فرکانس‌های بالا به شدت تحت میدان مغناطیسی طولی اعمال شده، تغییر می‌کند. اثر MI به عمق پوسته و نفوذپذیری مغناطیسی وابسته است [۳-۴]. امپدانس رسانای مغناطیسی برای یک نوار که تحت جریان طولی با فرکانس ω قرار دارد به صورت زیر نوشته می‌شود [۵]:

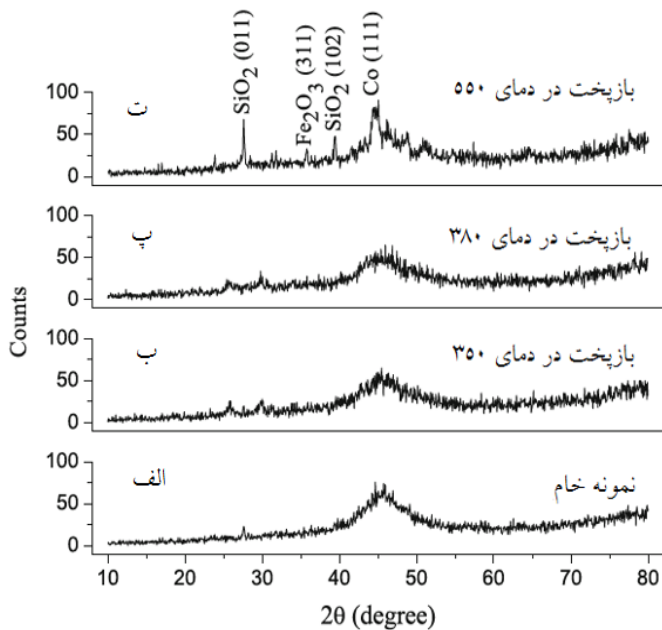
$$Z = \frac{(1-i)L}{2lc} (2\pi\rho\omega\mu_t)^{\frac{1}{2}} \quad (۱)$$

که در آن c سرعت نور، ρ مقاومت ویژه، μ_t نفوذپذیری مغناطیسی عرضی، L و l به ترتیب طول و عرض نمونه هستند. این معادله نشان می‌دهد که اثر MI از وابستگی μ_t به میدان خارجی ایجاد می‌شود. مناسب‌ترین مواد برای کاربرد در اثر امپدانس مغناطیسی (MI)، مواد مغناطیسی نرم همانند آلیاژهای آمورف و مواد مغناطیسی نانوبلورین هستند. هر چند آلیاژهای آمورف خام (بازپخت نشده) خود کاندید مناسبی برای اثر MI می‌باشند به کمک بازپخت می‌توان خواص مغناطیسی نمونه‌ها را اصلاح کرده و نفوذپذیری مغناطیسی آنها را افزایش، تنگش مغناطیسی و وامغناطیدگی را کاهش داده و در آنها ساختار نانو و ناهمسانگردی مغناطیسی القا و ایجاد کرد. بازپخت با جریان‌های مستقیم و متناوب، بازپخت کوره‌ای و بازپخت لیزری همگی تنش‌های داخلی را آزاد می‌کنند و یک محور ناهمسانگردی القا می‌کنند که می‌تواند باعث بهبود پاسخ امپدانس نمونه شود. متداول‌ترین روش بازپخت، گرما دادن به نمونه در کوره با اتمسفر هوا یا خلاء و یا در حضور گازهای بی‌اثر است که به پخت کوره‌ای مرسوم است. در این روش زمان پخت، دمای پخت، سرعت گرمادهی و پارامترهایی این چنین در بهینه کردن شرایط بازپخت قابل کنترل است.

روش آزمایش:

نوارهای آمورف کبالت پایه $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ با پهنای مختلف ۰/۸۱ mm (نمونه A) و ۴/۹۳ mm (نمونه B) با استفاده از روش انجماد سریع (روش مذاب چرخان) فراهم شده‌اند. در این آزمایش طول نوارها ۴ cm انتخاب شده است و همه‌ی نوارها دارای ضخامت یکسان ۲۸/۸ μm هستند. نوارهای آمورف کبالت پایه در

مقدار درصد امیدانس مغناطیسی برای نمونه‌ی A، ۱۲۰٪ مشاهده شد که مربوط به دمای ۳۸۰°C می‌باشد.



شکل ۱: منحنی پرتو پراش X برای نمونه‌های خام و بازپختی در دماهای مختلف

همچنین مطابق شکل ۳ بیشترین مقدار درصد امیدانس مغناطیسی برای نمونه B، ۸۰٪ مشاهده شد که مربوط به دمای ۳۸۰°C می‌باشد. بازپخت نمونه‌ها در دماهای پایین ابتدا باعث آزاد شدن آن از تنش‌های داخلی می‌شود. با افزایش دمای بازپخت، نمونه‌ها به سوی بلورین شدن، تشکیل نانوبلورک‌ها و نرمی مغناطیسی رفته که آن همراه با افزایش نفوذپذیری مغناطیسی است. افزایش نفوذپذیری مغناطیسی خود باعث افزایش درصد امیدانس مغناطیسی می‌شود. روند بهبود خواص مغناطیسی و ساختاری با افزایش بیشتر دما متوقف شده و نمونه از نظر مغناطیسی سخت شده و نفوذپذیری مغناطیسی و در نتیجه درصد امیدانس مغناطیسی آن کاهش می‌یابد. پس همان‌طوری که نفوذپذیری ماده به نظم داخلی مغناطش وابسته است، به هندسه‌ی نمونه، طبیعت القا، میدان، دما، فرکانس و توزیع تنش در ماده نیز بستگی دارد. تغییر در خواص مغناطیسی می‌تواند ناشی از جابجایی دیواره حوزه و یا چرخش گشتاورهای مغناطیسی در حوزه‌ها باشد. در ارتباط با رفتار فرکانسی، وقتی فرکانس به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، جابجایی دیواره‌ی حوزه‌ها به علت جریان ادی کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و مغناطش به واسطه‌ی چرخش در

درجه در نمودار نمونه خام نشان از آمورف بودن نمونه‌ها دارد [۷]. به منظور بررسی تغییر ساختار نمونه‌ها بعد از بازپخت، ضروری است ساختار نمونه قبل از پخت (در حالت خام) مشخص و سپس با نمونه‌ی بازپخت شده مقایسه شود. بنابراین از نمونه‌های A که در دماهای مختلف (۳۵۰، ۳۸۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) بازپخت شده‌اند نیز پراش پرتو X گرفته شده است. شکل (۱-ب-ت) منحنی پرتو پراش X برای نمونه‌های بازپختی در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. خاصیت آمورف بودن نمونه تا دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. ولی الگوی پراش پرتو X برای نمونه بازپختی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل فازهای بلورین SiO_2 ، Fe_2O_3 و Co را نشان می‌دهد. وجود اکسیژن در روند بازپخت در هوا باعث اکسید شدن سطح ماده، تغییر ساختار بخشی از ماده از حالت آمورف به بلور و نانوبلور و نیز سنجاق شدن حوزه‌های مغناطیسی در کنار ناحیه اکسید شده در سطح ماده می‌گردد. به علت تمایل زیادتر ترکیب با اکسیژن مواد شبه فلز بور و سیلیسیم نسبت به مواد دیگر در این ساختار، با افزایش دما، این مواد از داخل ساختار به ویژه در ناحیه‌ی سطحی و زیر آن، جدا شده و برای ترکیب با اکسیژن به سطح ماده حرکت می‌کنند. در آنجا با اکسیژن ترکیب شده و ساختارهای SiO_2 و B_2O_3 تشکیل می‌دهند. با افزایش دما و گذشت زمان در ناحیه‌ی زیر سطح، مواد بور و سیلیسیم تقریباً از ترکیب خارج شده و ساختار کبالت و آهن تقریباً خالص به وجود می‌آید. با این کار به دلیل کاهش ناخالصی‌ها از ساختار کبالت، دمای بلورین شدن آن کاهش می‌یابد. می‌توان گفت خوشه‌های بلوری ساختار کبالت به صورت مکعبی یا هگزاگونال در ماده به وجود آمده است [۷ و ۸]. فرآیند اکسید شدن سطح به ما این امکان را می‌دهد که با به دام انداختن حوزه‌های مغناطیسی روی سطح و همچنین ایجاد نانوبلورها ضمن کاهش وابستگی دمایی، شرایط را برای کاربرد در حسگرهای مغناطیسی کنترل‌پذیر کنیم. درصد امیدانس مغناطیسی مربوط به نوارهای خام و بازپخت شده در محیط هوا در دماهای ۲۵۰، ۳۵۰، ۳۸۰ و ۵۵۰°C محاسبه شد. نمودار درصد امیدانس مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی خارجی برای نمونه‌های A و B در شکل ۲ و ۳ رسم شده است. با توجه به شکل ۲ بیشترین

مغناطیسی با آزمایش محیط هوا دیده نشد، تنها تفاوت در متقارن بودن نمودارها بود. نامتقارنی امپدانس مغناطیسی با اکسید شدن سطح نمونه، و ایجاد دو ناهمسانگردی در آن ارتباط دارد. در شرایط محیط خلاء به علت عدم وجود اکسیژن، از اکسید شدن سطح نمونه جلوگیری می‌شود در نتیجه نمودار درصد امپدانس مغناطیسی، یک رفتار متقارن از خود نشان می‌دهد.

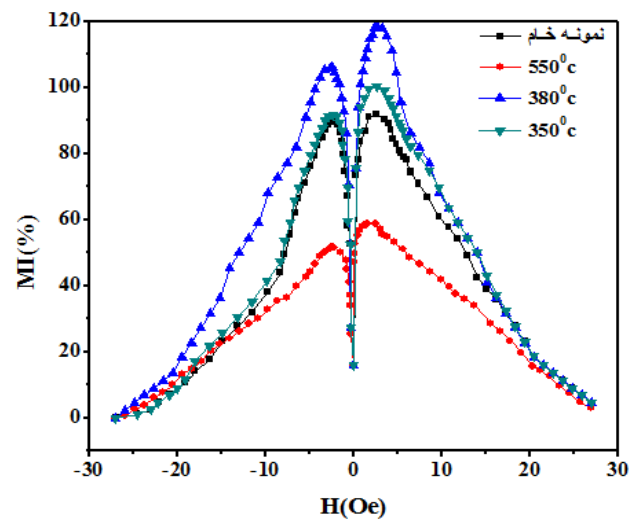
نتیجه گیری:

با بازپخت کوره‌ای نوارهای آمورف کبالت پایه می‌توان درصد MI آنها را افزایش داد. بیشترین درصد MI در بهینه دمای 380°C به ترتیب برای نوار با پهنای 0.81 mm و 4.93 mm مقادیر 120% و 80% مشاهده شد. بازپخت در دمای بالاتر از 550°C منجر به کاهش شدید درصد MI می‌شود. مقایسه‌ی نتایج آزمایش مبنی بر آن است که نمونه با پهنای کمتر، درصد امپدانس بیشتر و حساسیت میدان بالاتری از خود نشان می‌دهد، که نشانگر تاثیر مثبت کاهش پهنای نمونه در راستای ساخت اسباب حسگری می‌باشد.

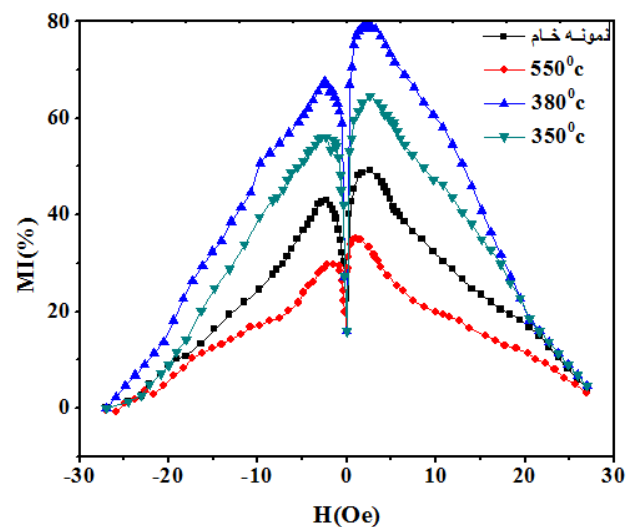
مرجع‌ها:

[1] C. Wu, J. Deng, J. Sun and Y. Yang; "A Design of Linear AGMI Sensor and Its Application for Tank Target Detection"; *ICEMI* (2009), pp. 21021-21026
 [2] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York, 1975), p.63.
 [3] N.H. Nghi, N.M. Hong, T.Q. Vinh, N.V. Dung and P.M. Hong; "GMI effect in amorphous and nanocrystalline magnetic materials"; *Physica B*. **327** (2003) 253.
 [4] M. Knobel, M.L. Sanchez, C. Gomez – Polo, P. Marin, M. Vazquez and A. Harnando; "Giant magneto-impedance effect in nanostructured magnetic wires"; *J. Appl. Phys.* **79** (1996) 1646.
 [5] J.P. Park, S.J. Suh, T.H. Noh, K.Y. Kim and H.J. Kim; "An effect of nitrogen on magnetic properties and microstructure of Fe–Nb–B–N nanocrystalline thin films"; *J. Appl. Phys.* **83** (1998) 6649.
 [6] M. Knobel, M. Vazquez and L. Kraus; "Giant magnetoimpedance" *Handbook of Magnetic Materials*, **15** (2003) 497.
 [7] S.C. Byeon, C.K. Kim, K.S. Hong, R.C. O Handley, "The relationship between microstructure and field-induced anisotropy in cobalt-rich amorphous alloys after magnetic field annealing", *Mater. Sci. Eng. B* **56** (1999) 58-65.
 [8] S.J. Ahn, C.K. Kim, S.J. Kim, D.K. Choi, R.C. O'Handley, "The magnetic properties of a magnetic detector using oxidized amorphous $\text{Co}_{0.5-x}\text{Fe}_x(\text{BSi})_x$ alloys", *J. Magn. Magn. Mater.* **217** (2000) 159,169.
 [9] M.R. Hajiali, S.M. Mohseni, S.E. Roozmeh, M. Moradi; "Asymmetric magnetoimpedance effect in CoFeSiB amorphous ribbons by combination of field and current annealing for sensor applications"; *J. Superlattices and Microstructures*. **96**, 191-197 (2016).

یک تک حوزه تغییر می‌کند. در نتیجه حرکت چرخشی مغناطش، رفتار نفوذپذیری را به واسطه‌ی عمق نفوذ کنترل می‌کند [۶].



شکل ۲: منحنی درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نمونه A خام و بازپخت شده در دماهای مختلف.



شکل ۳: منحنی درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نمونه B خام و بازپخت شده در دماهای مختلف.

نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد بحث نامتقارنی نمودارهای امپدانس مغناطیسی است [۹]. برهمکنش تبادلی بین ناهمسانگردی مغناطیسی تک‌محوری در هسته‌ی آمورف و ناهمسانگردی تک‌جهتی در لایه بلورین می‌تواند دلیلی برای ایجاد نامتقارنی امپدانس مغناطیسی در نوارهای آمورف کبالت پایه باشد. این آزمایش در محیط خلاء نیز انجام شد [۹]. در نتایج آن تفاوتی در درصد امپدانس