بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# اثر مگنتواپتیکی کر و امپدانس مغناطیسی نوارهای NiFeMo/Cu/NiFeMo

سمانه کلهر و مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانو مغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

**چکیده - در این مقاله به بررسی رفتار مغناطیسی نوار *NiFeMo (سوپرمالوی) از طریق اثر مگنتواپتیکی کر و امپدانس مغناطیسی بزرگ* پرداخته شد. نوار سوپرمالوی بر دو سمت زیرلایه مس به روش الکتروانباشت نشانده شد. با افزایش جریان لایه نشانی، افزایش نرخ لایه-نشانی مشاهده شد تا اینکه افزایش جریان لایه‌نشانی بیشتر از ۲۰۰ میلی‌آمپر، موجب شکنندگی ساختار لایه شد. نمودارهای پسماند مگنتواپتیکی وابستگی مغناطش ماده به جریان لایه‌نشانی را به خوبی نشان داد. در جریان ۸۰ میلی‌آمپر به دلیل سرعت پایین رشد امکان جهت‌گیری نواحی مغناطیسی در جهت مشخص وجود دارد. بیشترین امپدانس مغناطیسی برای جریان ۸۰ میلی‌آمپر مشاهده شد که نتایج اندازه‌گیری اثر کر را تایید می‌کند.**

کلید واژه- اثر مگنتواپتیکی، الکتروانباشت، امپدانس مغناطیسی بزرگ، سوپرمالوی.

# Magnetooptical Kerr effect and giant magneto-impedance in NiFeMo/Cu/NiFeMo ribbons

Samane Kalhor and Majid Ghanaatshoar

Laser and plasma research institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113, Tehran, Iran

Abstract- Magnetic behavior of electrodeposited NiFeMo/Cu/NiFeMo ribbon was investigated by means of magnetooptical Kerr effect and giant magneto-impedance measurement. NiFeMo magnetic ribbons were prepared by electrodeposition onto copper sheets. It was observed that the rate of deposition increases with current density. The hysteresis loops of the ribbons show the dependence of the sample magnetization on current of electrodeposition. For current densities higher than 200 mA, the quality of the electrodeposited layers was not perfect and the magneto-impedance response fell down substantially. The best giant magneto impedance belongs to the sample, deposited at the current of 80 mA and in good consistency with the results of the Kerr effect which verifies the proper configuration of the magnetic domains.

Keywords: electrodeposition, giant magneto-impedance, magnetooptical Kerr effect, supermalloy.

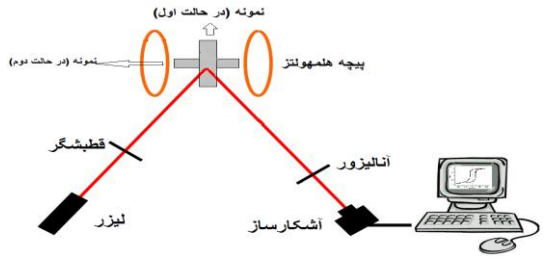
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۱-مقدمه

رفتار مغناطش سطحی ماده می‌تواند توسط اثر مگنتواپتیکی کر سنجیده شود. اولین مطالعه بر روی فیلم نازک آهن در حدود ۲۶ سال پیش توسط اثر کر انجام شد. از آن پس اثر کر به طور گسترده به منظور بررسی ویژگی فیزیکی فیلم‌های نازک، سیم‌ها و میکروسیم‌ها و همچنین نوارهای آمورف و نانوبلوری مورد استفاده قرار گرفت [۱]. اساس اثر مگنتواپتیکی کر، در برهمکنش بین نور فرودی و سطح مغناطیده است که منتج به چرخش صفحه قطبش می‌شود. دامنه این چرخش متناسب با مغناطش نمونه است. به منظور درک بهتر رفتار مغناطیسی ماده علاوه بر اثر کر از امپدانس مغناطیسی بزرگ استفاده می‌شود. امپدانس مغناطیسی بزرگ به صورت تغییرات امپدانس الکتریکی ماده نرم مغناطیسی زمانیکه در معرض میدان مغناطیسی مستقیم خارجی قرار می‌گیرد و همزمان از ماده جریان متناوب می‌گذرد، تعریف می‌شود:

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

که در آن، $|Z|$ اندازه امپدانس و $H_{max}$ مقدار بیشینه میدان خارجی اعمال شده به نمونه است [۲]. پارامترهای اساسی در اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ، گذردهی مغناطیسی بالا، میدان وادارندگی پایین و مگنتوتنگش نزدیک به صفر نمونه است. از اینرو سوپرمالوی می‌تواند ماده مناسبی برای این امر باشد. علی‌رغم بررسی امپدانس مغناطیسی سیم‌های پرمالوی تا کنون به تحقیق در مورد اثر کر و امپدانس مغناطیسی نوارهای پرمالوی پرداخته نشده است [۳]. در این تحقیق به لایه‌نشانی نوار بر روی زیرلایه مسی با استفاده از روش الکتروانباشت پرداخته‌ایم.




شکل ۱: چیدمان کر نمونه در حالتی که میدان در عرض نمونه است (۱) و حالتیکه میدان در طول نمونه است (۲)

روش الکتروانباشت یک روش ساده است که امکان تولید نمونه به شکل دلخواه (سیم، نوار و ...) را می‌دهد. سپس به بررسی رفتار مغناطیسی نوار پرمالوی در جریان‌های مختلف لایه‌نشانی با استفاده از اثر کر و امپدانس مغناطیسی می‌پردازیم.

## ۲-بخش تجربی

به منظور لایه‌نشانی الکتروشیمیایی از یک سلول سه الکترودی استفاده شده است که الکترود نقره/نقره کلرید به عنوان الکترود مرجع و الکترود استیل به عنوان الکترود مقابل و نوار مسی به عنوان الکترود کار به کار گرفته شده است. طول نوار ۶ سانتی متر و عرض آن ۴ میلیمتر و ضخامت آن ۵۵ میکرومتر انتخاب شد. قبل از لایه نشانی ضخامت نوار با روش سایش‌الکتریکی به ۳۶ میکرومتر کاهش داده شد. به این ترتیب تمام آلودگی‌ها از سطح نوار برداشته می‌شوند و سطح مس براق و تمیز خواهد شد. ترکیبات الکترولیت شامل $NiSo_4.7H_2O$ با غلظت $60\ gl^{-1}$، $FeSo_4.6H_2O$ با غلظت $4\ gl^{-1}$، $Na_2MoO_4.2H_2O$ با غلظت $2\ gl^{-1}$، NaCl با غلظت $10\ gl^{-1}$، سیتریک اسید با غلظت $30\ gl^{-1}$ و ساخارین با غلظت $5\ gl^{-1}$ است. ترکیبات الکترولیت در آب مقطر حل شد و pH الکترولیت روی ۱/۳۵ قرار گرفت. ۵ سانتیمتر از طول نوار درون سلول الکترولیت قرار داده شد و لایه‌نشانی به روش جریان ثابت با عبور جریان‌های ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ میلی‌آمپر از نوار بوسیله کولومتر ZCM 761 و در دمای تقریبی ۶۵ درجه سلسیوس و به مدت ۱ ساعت انجام شد. به منظور بدست آوردن حلقه پسماند نمونه از چیدمان کر طولی استفاده شد. چیدمان شامل لیزر He-Ne، یک قطبشگر برای ایجاد قطبش خطی در نور فرودی، نمونه، یک آنالیزور و آشکارساز برای اندازه‌گیری شدت نور است. میدان در محل نمونه به وسیله یک تسلامتر اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال دریافت شده به وسیله آشکارساز همراه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط تسلامتر برای رسم حلقه پسماند به کامپیوتر وارد می‌شوند. نمونه به دو حالت در میدان قرار داده شد و هر بار حلقه پسماند رسم شد. در حالت اول میدان به عرض نمونه و در حالت دوم در طول نمونه اعمال شد (شکل ۱).

برای اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی از یک چیدمان



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

آزمایشگاهی استفاده شد که به نمونه به طول ۳۳ میلی-متر جریان متناوب ۲۷ میلی‌آمپر در فرکانس ۱۰ مگاهرتز اعمال می‌کند. نمونه در معرض میدان مغناطیسی مستقیم سیملوله قرار داده شد که در آن میدان مغناطیسی به صورت پله‌ای از ۳۰۰- تا ۳۰۰ اورستد افزایش می‌یابد. سیملوله به صورت شرقی-غربی قرار گرفت تا اثر میدان مغناطیسی زمین را به حداقل برسانیم. در هر پله امپدانس نمونه از طریق نسبت ولتاژ دو سر نمونه به جریان عبوری ازآن بدست آمد. به منظور ثبت امپدانس و محاسبه درصد تغییرات آن از رایانه استفاده شده است [۴،۵]. امپدانس مغناطیسی در دو هندسه طولی، زمانیکه میدان مستقیم خارجی موازی محور نوار است و در هندسه عرضی، زمانیکه میدان خارجی عمود بر محور آن است، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۳-نتایج و بحث

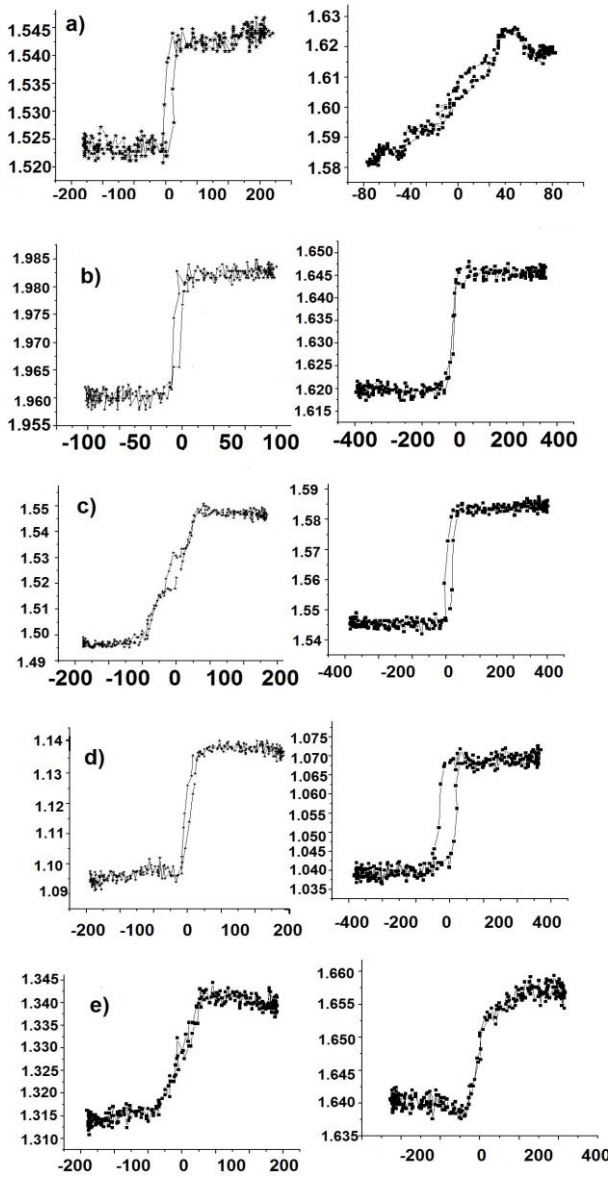
جریان لایه‌نشانی علاوه بر کنترل ضخامت فیلم بر روی اندازه دانه‌های نشانده شده تاثیر می‌گذارد و اندازه دانه‌ها بطور مستقیم بر گذردهی مغناطیسی ماده و سرانجام بر رفتار مغناطیسی ماده تأثیر دارد. بعلاوه، جریان لایه‌نشانی درصد ترکیبات آلیاژ نشانده شده را کنترل می‌کند. در جدول ۱ ضخامت لایه نهایی نوار پس از لایه‌نشانی بر حسب جریان اعمالی را مشاهده می‌کنیم. لازم به ذکر است که در جریان بالاتر از ۲۰۰ میلی‌آمپر شاهد شکننده شدن لایه نشانده شده هستیم، به همین دلیل، به بررسی اثر جریان‌های بالاتر از ۲۴۰ میکروآمپر نپرداختیم.

جدول ۱: ضخامت نمونه‌ها بر حسب چگالی جریان.

| ضخامت (μm) | جریان (mA) |
|---|---|
| 130 | 240 |
| 108 | 200 |
| 94 | 160 |
| 131 | 120 |
| 55 | 80 |

به این دلیل از نوار سه لایه NiFeMo/Cu/NiFeMo استفاده شد که تحقیقات نشان می‌دهد، در ساختار چندلایه، لایه رسانای درونی، مسیر اصلی حرکت جریان متناوب است و لایه فرومغناطیسی خارجی مسیر حرکت شار مغناطیسی القا شده توسط جریان متناوب خواهد بود، بنابراین احتیاجی به اثر پوسته‌ای قوی نداریم [۶].

در شکل ۲ حلقه پسماند سیگنال کر طولی نمونه در حالتیکه میدان در عرض نمونه اعمال شده (سمت راست) و حالتیکه میدان در طول نمونه اعمال شده (سمت چپ) برای جریان های۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰و ۲۴۰ میلی‌آمپر (از بالا به پایین) دیده می‌شود.



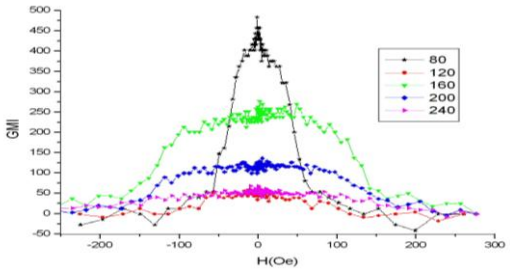

شکل ۲: حلقه پسماند طولی نمونه {سیگنال کر طولی نمونه(واحد دلخواه) بر حسب میدان مغناطیسی(واحد ارستد)} در حالتیکه میدان در عرض نمونه است (سمت راست) و حالتیکه میدان در طول نمونه است (سمت چپ) برای جریان *a*)۸۰، *b*)۱۲۰، *c*)۱۶۰، *d*)۲۰۰ و *e*)۲۴۰ میلی‌آمپر.

همچنین در شکل ۳ و ۴ به ترتیب امپدانس مغناطیسی عرضی و طولی نمونه برای جریان‌های مختلف آورده شده

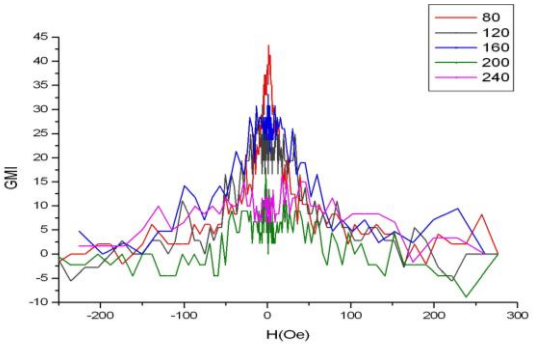


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

است. میدان اشباع نمونه‌ها به جز نمونه ۸۰ میلی‌آمپر در حالت اعمال میدان عرضی بیشتر از میدان طولی است، به همین دلیل امپدانس مغناطیسی عرضی هم دیرتر از امپدانس مغناطیسی طولی به اشباع رسیده است. تفاوت حلقه پسماند هر جریان در دو جهت اعمال میدان عرضی و طولی، معرف وجود ناهمسانگردی شکلی در نمونه است، که البته با توجه به مستطیلی بودن نوارها این امر قابل پیش‌بینی بود.




شکل ۳: منحنی امپدانس مغناطیسی عرضی نمونه‌ها به جریان‌های لایه نشانی ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ میلی‌آمپر.




شکل ۴: شکل۳: منحنی امپدانس مغناطیسی طولی نمونه‌ها به جریان‌های لایه نشانی ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ میلی‌آمپر.

پهنای بالای منحنی امپدانس عرضی برای جریان‌های ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ میلی‌آمپر تصدیق‌کننده میزان بالای میدان ناهمسانگردی در نمونه‌ها است. با توجه به راستای میدان ناشی از جریان متناوب و میدان خارجی، در هندسه طولی امپدانس مغناطیسی، گذردهی مغناطیسی عرضی نقش اساسی را بازی می‌کند، و در هندسه عرضی امپدانس مغناطیسی، گذردهی طولی نقش اساسی را بازی می‌کند [۷]. مربعی بودن حلقه پسماند نمونه با جریان ۸۰ میلی‌آمپر در شکل ۲a سمت چپ نشان می‌دهد که ممان‌ها تمایل به جهت‌گیری در سمت طول نوار را دارند. در نمونه با جریان ۱۶۰ میلی‌آمپر با توجه به مربعی بودن حلقه پسماند شکل ۲c سمت راست، تمایل ممان‌ها در جهت عمود بر محور نوار است. میزان بالاتر امپدانس مغناطیسی عرضی هم این موضوع را نشان می‌دهد. برای نمونه با جریان ۲۴۰ میلی‌آمپر، محور آسان نمونه نه در جهت محور نوار و نه در جهت عمود بر آن است. چگالی جریان بالای لایه‌نشانی در این نمونه باعث کاهش کیفیت لایه شده است که کاهش شدید امپدانس مغناطیسی را به همراه دارد. نباید فراموش کرد که اثر کر مگنتواپتیکی یک پدیده سطحی است و بیشتر اطلاعات حاصل از آن به توزیع نواحی مغناطیسی سطحی مربوط می‌شود. این در حالی است که امپدانس مغناطیسی یک پدیده حجمی با عمق نفوذ بیشتر به داخل نمونه است. از اینرو پدیده‌های سطحی مثل جفت‌شدگی تبادلی را مثلا در شکل ۲c سمت چپ به راحتی می‌بینیم اما نشانه‌ای از آن در پاسخ امپدانسی دیده نمی‌شود.

## ۴-نتیجه‌گیری

نوار پرمالوی به روش الکترونباشت بر روی زیرلایه مسی نشانده شد. نتایج حلقه پسماند کر وابستگی مغناطش ماده را به جریان لایه نشانی نشان داد. همچنین منحنی امپدانس مغناطیسی ماده به تبع مغناطش، وابسته به جریان لایه‌نشانی است. همخوانی خوبی بین نتایج اثر مگنتواپتیکی کر و امپدانس مغناطیسی وجود دارد.

## مراجع


[1] O. Zivotsky, A. Hendrych, L. Klimsa, Y. Jiraskova, J. Bursık, J.A.M. Gomez, D. Janickovic, *Surface microstructure and magnetic behavior in FeSiB amorphous ribbons from magneto-optical Kerr effect*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 324 (2012) 569–577.

[2] H. Uppili, B. Daglen, *Bi-Directional Giant Magneto Impedance Sensor*, **Advances in Materials Physics and Chemistry,** 3 (2013) 249-254.

[3] H.L. Seet, X.P. Li, H.J. Neo, K.S. Lee, *Magnetic properties of high permeability NiFeMo/Cu composite wire*, **Journal of Alloys and Compounds**, 449 (2008) 96–100.

[4] M. Ghanaatshoar, N. Azad, M.H. Banitaba, B. Shokri, *Giant magnetoimpedance effect of ac-dc Joule annealed electroplated NiFe/Cu composite wires*, **Physica Status Solidi C 8**, 11–12 (2011) 3055-3058.

[5] M. Ghanaatshoar, M.M. Tehranchi, S.M. Mohseni, M. Parhizkari, S.E. Roozmeh, A. Jazayeri Gharehbagh, *Magnetoimpedance effect in current annealed Co-based amorphous wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials,** 304 (2006) 706–708.

[6] Sh.Q. Xiao, Y.H. Liu, Y.Y. Dai, L. Zhang, Sh.X. Zhou and G.D. Liu, *Giant magnetoimpedance effect in sandwiched films*, **Journal of Applied Physics**, 85 (1999) 4127-4130.

[7] R.L. Sommer and C.L. Chien, Longitudinal and transverse magneto-impedance in amorphous FeCuNbSiB films**, Applied Physics Letters**. 67 (1995) 3346-3348.




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]