

ناهمسانگردی مغناطیسی در لایه‌های نازک کبالت - پالادیوم $\text{Co}_x\text{Pd}_{1-x}$ روی زیرلایه SiO_2 آمورف

مهران سدرپوشان و حسین احمدوند

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: ahmadvand@iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰)

چکیده

لایه‌های نازک کبالت - پالادیوم با نسبت‌های مختلف، ($\text{Co}_x\text{Pd}_{1-x}$ ($x=۲۳, ۳۶, ۴۳$))، به روش لیزر پالسی روی زیر لایه فیوز سیلیکا (SiO_2 آمورف) رشد داده شدند. به منظور مشخصه‌یابی ساختاری نمونه‌ها از تحلیل‌های بازتابش پرتو ایکس (XRR) و پراش پرتو ایکس (XRD) و برای بررسی ویژگی‌های مغناطیسی از دستگاه اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی (PPMS) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌ها ضخامت در محدوده ۱۶ تا ۲۰ نانومتر دارند و ساختار بلوری آنها مکعبی مرکز حجمی (FCC) است. همچنین لایه‌ها رشد مرجع در راستای [۱۱۱] دارند. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی این لایه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پالادیوم به کبالت، ناهمسانگردی مغناطیسی متمایل به جهت عمود بر لایه می‌شود که این اثر به تقویت برهم‌کنش اسپین - مدار ارتباط داده شده است. همچنین در این پژوهش اثر ضخامت بر ناهمسانگردی مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: لایه نازک، لایه‌نشانی لیزر پالسی، کبالت - پالادیوم، ناهمسانگردی مغناطیسی

۱. مقدمه

امروزه لایه‌های نازک مغناطیسی از جمله مباحث مهم پژوهشی هستند که در آن ویژگی‌های ساختاری و خواص مغناطیسی به شدت به یکدیگر وابسته‌اند. به دلیل اهمیت لایه‌های نازک در مطالعات بنیادی مغناطیس و همچنین کاربردهای عملی در اسپینترونیک و محیط‌های ضبط مغناطیسی، این دستگاه دو بعدی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. آلیاژهای فلزات واسطه دارای عناصر فرومغناطیسی (Co و Fe) مانند آلیاژهای

CoPd، FePd، CoPt، FePt و CoPd که ویژگی‌های مغناطیسی کاربردی بسیار خوبی دارند، توجه زیادی را به خود معطوف کرده‌اند [۱-۳]. ناهمسانگردی مغناطیسی یکی از مهم‌ترین پارامترها در این دستگاه‌ها است. ناهمسانگردی‌های مغناطیسی، مغناطیسیاتیک، مغناطیسیاتیک و اثرات سطحی نقش مهمی در ناهمسانگردی این لایه‌های مغناطیسی دارند. در آلیاژهایی دوتایی مانند CoPd، ترکیب شیمیایی پارامتری مؤثر است که بر انواع ناهمسانگردی‌های مذکور اثر می‌گذارد [۴-۶]. در واقع، با

تغییر در ترکیب شیمیایی، برهم کنش اسپین-مدار، مغناطش، پارامتر شبکه و لذا تنش موجود در لایه تأثیر می‌پذیرد.

در لایه‌های نازک مغناطیسی، به دلیل این که دستگاه تقریباً دو بعدی است، مغناطش تمایل دارد برای کمینه شدن انرژی در صفحه قرار گیرد و لذا راستای آسان مغناطیسی در صفحه لایه نازک قرار می‌گیرد؛ اما علی‌رغم این مطلب، در صورتی که راستای آسان عمود بر صفحه باشد امکان ذخیره‌سازی داده بیشتری در حافظه‌های مغناطیسی، در واحد سطح، فراهم می‌شود که از نظر کاربردی بسیار قابل توجه است. از این رو تلاش‌های زیادی انجام شده است تا با تغییر پارامترهای مختلف به این مهم دست یافته شود [۷-۱۰].

در این پژوهش، تأثیر نسبت Co: Pd بر ناهمسانگردی مغناطیسی لایه‌های نازک CoPd رشد یافته با روش لایه‌نشانی لیزر پالسی (PLD) بر روی زیرلایه‌های فیوز سیلیکا (SiO₂) آمورف) مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌ها در جهت راستای ناهمسانگردی مغناطیسی [۱۱] رشد کرده‌اند که زمینه مناسبی برای مطالعه این ناهمسانگردی با تغییر ترکیب را به وجود آورده‌اند [۱۱]. همچنین، از آنجا که زیرلایه آمورف است، تنش میان لایه و زیرلایه ناچیز است. این مسئله چنین لایه‌هایی را به دستگامی مناسب برای بررسی چرایی رفتار نایکنواخت و ادارندگی و مغناطش پسماند تبدیل کرده است [۱۲].

۲. بخش تجربی

به منظور ساخت لایه‌های نازک کبالت-پالادیوم روی زیرلایه فیوز سیلیکا از دستگاه لایه‌نشانی لیزر پالسی با لیزر اگزایمر KrF (طول موج ۲۴۸ nm) ساخت شرکت لامبدا فیزیک^۱ استفاده شده است. لایه‌نشانی با نرخ تکرار ۶ Hz تحت خلأ^۲ ۱۰^{-۶} Torr انجام گرفته است. در فرایند لایه‌نشانی، از هدف کبالت و پالادیوم فلزی متصل به یکدیگر استفاده شده است و این هدف در مقابل پرتو لیزر به چرخش در آمد تا پرتو به هر دو فلز اصابت کند. به منظور افزایش نسبت Co: Pd، هدف به شکلی تنظیم می‌شد که تعداد پالس‌های بیشتری به کبالت

اصابت کند. با تنظیم وضعیت نسبی قطعه کبالت نسبت به پالادیوم، سه لایه با درصد‌های مختلف Co: Pd ساخته شد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها در دمای اتاق لایه‌نشانی شده‌اند و در ادامه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰۰°C داخل محفظه لایه‌نشانی در خلأ پخت شده‌اند.

برای تشخیص ساختار بلوری از تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) و برای اندازه‌گیری ضخامت و زبری سطح لایه‌ها از تحلیل بازتابش پرتو ایکس^۲ استفاده شده است که هر دو اندازه‌گیری با دستگاه Rigaku SmartLab انجام گرفته‌اند. به منظور تشخیص ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از تحلیل پراش انرژی پرتو ایکس موجود در میکروسکوپ الکترونی روبشی ESEM ۲۰۰ FEI Quanta استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نیز با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی (PPMS) مدل Quantum Design DynaCool در دمای اتاق انجام گرفته‌اند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ویژگی‌های ساختاری

با کمک تحلیل پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، مشخص شد که ترکیب لایه‌های ساخته شده به صورت (۲۳، ۳۶ و ۴۳) Co_xPd_{۱۰۰-x} هستند. ضخامت و زبری سطح نمونه‌ها با برازش الگوهای بازتابش پرتو ایکس (XRR) با نرم‌افزار GenX محاسبه شده‌اند. محاسبات این نرم‌افزار، بر اساس مدل بازگشتی پارات است [۱۳]. شکل ۱ الگوهای بازتابش برازش شده و جدول ۱ نتایج حاصل از برازش را نشان می‌دهد. شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش میزان کبالت، میرایی الگوهای تداخلی بیشتر شده است. این رفتار نشان دهنده افزایش زبری سطح با افزایش کبالت است که با نتایج عددی حاصل در جدول ۱ تطابق دارد. ضخامت لایه بر اساس پهنای قله‌ها محاسبه شده است و همان طور که نتایج نشان می‌دهند، ضخامت نمونه‌ها در بازه محدود ۱۶ تا ۲۰ نانومتری است. به منظور بررسی ساختار بلوری لایه‌ها تحلیل پراش پرتو ایکس به کار گرفته شده است

۲. X-ray reflectometry (XRR)

۱. Lambda Physik

کوچک‌تری به اشباع می‌رسد. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش پالادیوم، جهت ناهمسانگردی به سمت عمود بر سطح متمایل می‌شود که در تطابق با نتایج سایرین است [۱۲ و ۱۴]. آلیاژ CoPd ضرایب مغناطوبلوری K_1 و K_2 منفی دارد [۱۱۱]. این نکته باعث می‌شود تا راستای آسان مغناطیسی آن در راستای $\langle 111 \rangle$ قرار گیرد. با توجه به این نکته و راستای رشد نمونه‌ها، تغییرات مشاهده شده در حلقه‌های پسماند را می‌توان مستقیماً به ناهمسانگردی مغناطوبلوری نسبت داد. در واقع خواص مغناطیسی کبالت بعد از آلیاژ شدن با عناصر سنگینی همانند پالادیوم، به شدت وابسته به هیبریداسیون بین نوار $3d$ کبالت و نوار $4d$ پالادیوم است. این هیبریداسیون نقش اساسی در ناهمسانگردی دارد. در این میان، برای توضیح تقویت ناهمسانگردی عمودی با افزایش میزان پالادیوم، می‌توان به تغییرات برهم‌کنش اسپین-مدار اشاره کرد. مطالعاتی که در مورد آلیاژهای دوتایی مغناطیسی انجام شده است نشان می‌دهند که اثر اسپین-مدار (قابل کنترل با میزان اتم‌های سنگین همانند Pt و Pd) می‌تواند در تغییر مقدار و جهت ناهمسانگردی بسیار تأثیرگذار باشد [۵، ۱۵ و ۱۶]. لذا، با افزایش نسبت پالادیوم به کبالت، برهم‌کنش اسپین-مدار تقویت می‌شود که در نهایت منجر به تقویت ناهمسانگردی مغناطوبلوری می‌شود.

با این حال، اثرات دیگری نیز بر ناهمسانگردی لایه‌های نازک مغناطیسی اثرگذار هستند. در لایه‌های نازک مغناطیسی، انرژی کل ناهمسانگردی مغناطیسی را می‌توان به شکل زیر نوشت.

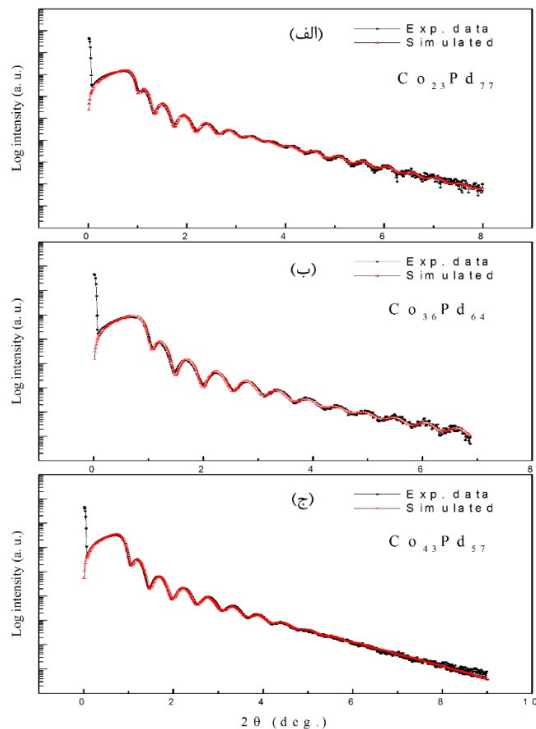
$$E = K_{\text{eff}} \sin^2 \theta, \quad (1)$$

که در آن θ زاویه بین مغناطش و عمود بر سطح و K_{eff} ثابت ناهمسانگردی کل است که به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۷]:

$$K_{\text{eff}} = K_{\text{mc}} - 1/2 \mu_s M_s^2 + K_{\text{me}} + K_s/d, \quad (2)$$

که K_{mc} ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلوری، M_s مغناطش اشباع، K_{me} ثابت مغناطوالاستیک و K_s ثابت ناهمسانگردی عمود بر سطح و d ضخامت لایه است.

مغناطش اشباع آلیاژ کبالت-پالادیوم به شدت تحت تأثیر میزان کبالت است و با افزایش کبالت تقریباً به صورت خطی



شکل ۱. الگوهای تحلیل بازتابش پرتو ایکس به همراه منحنی برازش شده نمونه (الف) $\text{Co}_{0.23}\text{Pd}_{0.77}$ (ب) $\text{Co}_{0.36}\text{Pd}_{0.64}$ و (ج) $\text{Co}_{0.43}\text{Pd}_{0.57}$.

که نتایج آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. الگوها نشان می‌دهند که نمونه‌ها رشدی مرجح در راستای $[111]$ دارند و ساختار بلوری لایه‌ها، ساختار A_1 (FCC) است. با استفاده از مکان قله و رابطه براگ، پارامتر شبکه لایه‌ها محاسبه شده است (جدول ۱) که نشان می‌دهد با افزایش نسبت $\text{Co}:\text{Pd}$ این پارامتر کاهش می‌یابد. علت این تغییر کوچک‌تر بودن شعاع اتمی کبالت نسبت به پالادیوم است.

۲.۳. ویژگی‌های مغناطیسی

شکل ۳، حلقه‌های پسماند عمودی و موازی لایه‌های نازک $\text{Co}_x\text{Pd}_{1-x}$ ($x=0.23, 0.36, 0.43$) را در دمای اتاق نشان می‌دهد. در حالت موازی (عمودی)، میدان مغناطیسی موازی (عمود بر) سطح لایه اعمال شده است. همچنان که شکل نشان می‌دهد، با افزایش میزان پالادیوم در حالت عمودی، حلقه پسماند در میدان

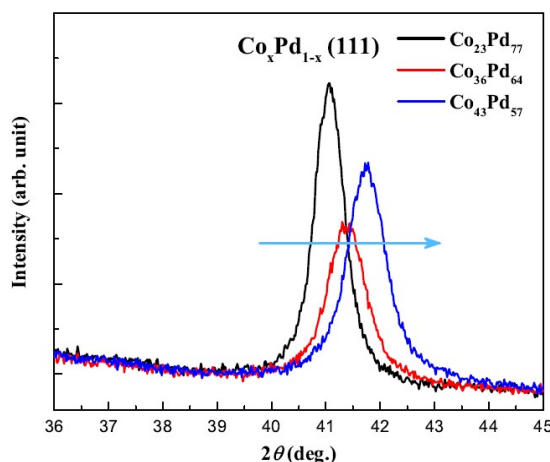
جدول ۱. ضخامت، زبری سطح و پارامتر شبکه لایه‌های نازک کبالت-پالادیوم.

نمونه	ضخامت (nm)	زبری سطح (Å)	پارامتر شبکه (Å)
Co ₂₃ Pd ₇₇	۱۹/۰ ± ۸/۴	۴/۹	۳/۸۰
Co ₃₆ Pd ₆₄	۱۶/۰ ± ۸/۴	۵/۰	۳/۷۸
Co ₄₃ Pd ₅₇	۱۶/۰ ± ۵/۴	۵/۲	۳/۷۴

نسبت به دو نمونه دیگر به اشباع می‌رسد. از طرفی میدان اشباع این نمونه در حالت عمود کمتر از حالت درون صفحه است. در حالی که نمونه‌های لایه نازک Co_{۳۶}Pd_{۶۴} و Co_{۴۳}Pd_{۵۷} در حالت درون صفحه‌ای زودتر به اشباع می‌رسند. این نتایج به خوبی نشان می‌دهند که با افزایش میزان پالادیوم، مغناطش تمایل دارد به حالت عمودی جهت‌گیری کند.

هرچند، میدان اشباع و شکل حلقه‌های پسماند در شکل ۳ تغییرات یکنواختی از خود نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که وادارندگی نمونه‌ها به‌عنوان پارامتری غیر ذاتی تغییرات غیریکنواخت دارد. این نوع تغییرات در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده‌اند و به اثرات مغناطیسی و اندازه دانه‌ها نسبت داده می‌شوند [۱۲ و ۲۰]. در این نمونه‌ها به دلیل آمورف بودن زیرلایه، سهم اثرات مغناطیسی در همه نمونه‌ها تقریباً یکسان است و لذا اهمیت اندازه دانه بروز پیدا می‌کند.

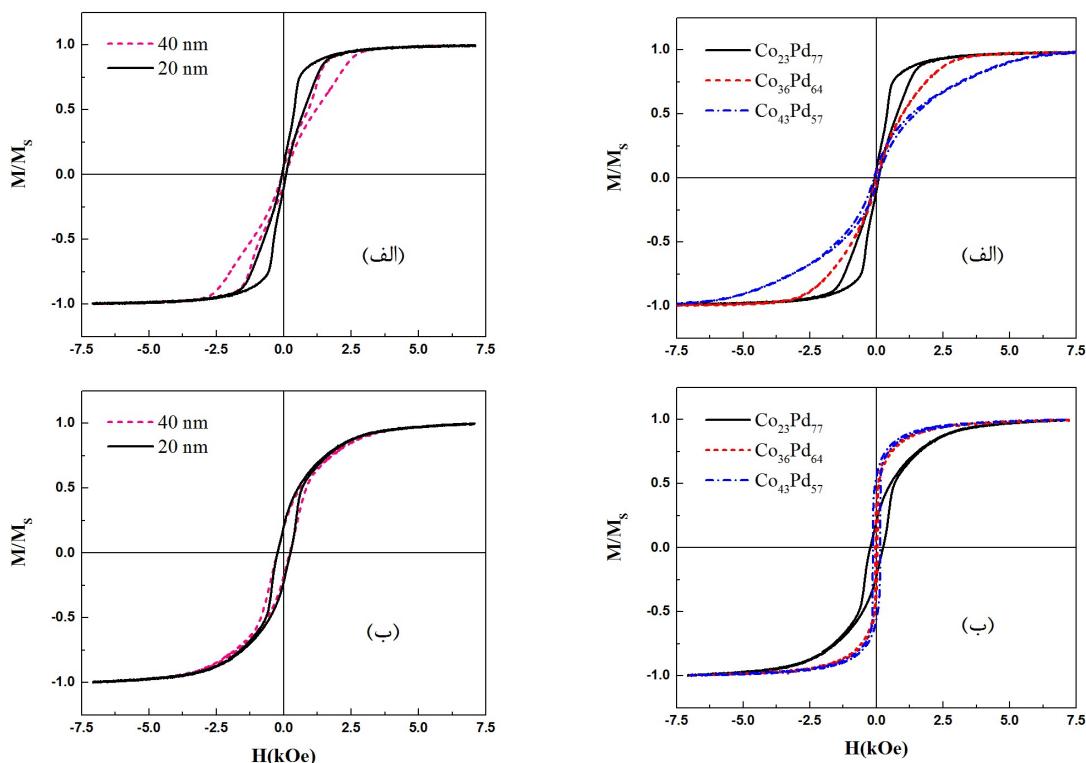
به منظور بررسی اثر ضخامت، لایه نازک Co_{۳۳}Pd_{۶۷} با ضخامت بیشتر (۴۰ nm) نیز لایه‌نشانی و مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ حلقه‌های پسماند نمونه‌های ۲۰ nm و ۴۰ nm ترکیب Co_{۳۳}Pd_{۶۷} را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، راستای آسان نمونه نازک‌تر به سمت عمود بر صفحه تمایل بیشتری دارد و در واقع ناهمسانگردی (تفاوت بین دو حالت عمود و موازی) در لایه نازک‌تر (۲۰ نانومتر) بیشتر است. علت این رفتار تضعیف ناهمسانگردی ناشی از سطح با افزایش ضخامت است که با رابطه ۲ در تطابق است که با ضخامت رابطه ۲ در تطابق است. از طرفی، مشاهده می‌شود که وادارندگی این دو نمونه بسیار به یکدیگر نزدیک است و این نکته می‌تواند اثرگذاری نسبت Co:Pd به اندازه دانه را نشان دهد.



شکل ۲. الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک CoPd زیرلایه SiO_۲ آمورف.

افزایش می‌یابد [۷]. بنابراین، علاوه بر اثر تقویت برهم‌کنش اسپین-مدار (افزایش K_{mc}) که توضیح داده شد، می‌توان کاهش مغناطش و تغییر اثرات سطحی (تغییر K_s) را نیز اثرگذار دانست، هر چند که تقویت ناهمسانگردی مغناطیسی را می‌توان پدیده غالب دانست [۶، ۱۱ و ۱۸]. یک نکته قابل توجه دیگر که می‌توان در شکل ۳ الف مشاهده کرد، شکل متفاوت حلقه پسماند لایه Co_{۳۳}Pd_{۶۷} (نازک‌تر شدن حلقه پسماند در نزدیکی میدان‌های صفر) است. این رفتار در حلقه پسماند لایه‌های نازک مغناطیسی، عموماً به وجود حالت‌های گردابی اسپینی (ورتکس) ارتباط داده می‌شود [۱۹ و ۲۰].

اندازه میدان وادارندگی و میدان اشباع نمونه‌ها (در دو حالت عمود و موازی) در جدول ۲ گزارش شده است. مقادیر میدان اشباع نمونه‌ها نشان می‌دهند که لایه نازک Co_{۳۳}Pd_{۶۷} در حالت عمود، در میدان مغناطیسی کمتری (۴/۷ کیلوارستد)



شکل ۳. حلقه‌های پسماند (الف) عمودی و (ب) درون صفحه‌ای لایه‌های نازک CoPd بر زیرلایه SiO_2/Si آمورف. شکل ۴. حلقه‌های پسماند مغناطیسی (الف) عمودی و (ب) درون صفحه‌ای لایه‌های نازک $\text{Co}_{77}\text{Pd}_{23}$ با ضخامت ۲۰ و ۴۰ نانومتر.

جدول ۲. میدان وادارندگی و اشباع درون صفحه و عمود بر صفحه لایه‌های نازک کبالت-پالادیوم.

نمونه	وادارندگی درون صفحه (Oe)	وادارندگی عمود بر صفحه (Oe)	میدان اشباع عمود بر صفحه (kOe)	میدان اشباع درون صفحه (kOe)
$\text{Co}_{77}\text{Pd}_{23}$	۲۴۰	۷۵	۴/۷	۵/۸
$\text{Co}_{64}\text{Pd}_{36}$	۳۹	۴۲	۵/۱	۴/۶
$\text{Co}_{57}\text{Pd}_{43}$	۱۳۷	۷۶	۷/۲	۴/۱

۴. نتیجه‌گیری

به منظور مطالعه ناهمسانگردی مغناطیسی لایه‌های نازک کبالت-پالادیوم، این لایه‌ها با سه نسبت مختلف $\text{Co}_{77}\text{Pd}_{23}$ ، $\text{Co}_{64}\text{Pd}_{36}$ ، $\text{Co}_{57}\text{Pd}_{43}$ روی زیرلایه فیوز سیلیکا (SiO_2 آمورف) لایه‌نشانی شدند. طیف پراش اشعه ایکس نشان داد که رشد لایه‌ها در جهت [۱۱۱] است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پالادیوم، راستای ناهمسانگردی مغناطیسی به سمت عمود بر

سطح لایه متمایل می‌شود. همچنین در لایه‌های نازک $\text{Co}_{77}\text{Pd}_{23}$ با کاهش ضخامت از ۴۰ به ۲۰ نانومتر، ناهمسانگردی (بین حالت عمود و موازی) افزایش پیدا می‌کند.

۵. تشکر و قدردانی

کلیه اندازه‌گیری‌های گزارش شده در این مقاله در دانشگاه آلتو در کشور فنلاند انجام شده است. از آقای دکتر سبستین وان

دیجکن بابت فراهم آوردن شرایط انجام این پروژه قدردانی می‌شود.

مراجع

- Fert, A Schuhl, et al., *Journal of Applied Physics* **75** (1994) 6412.
12. V R Mudinepalli, Y C Chen, P C Chang, C C Hsu, C Y Tsai, H C Chiu, et al., *Journal of Alloys and Compounds* **695** (2017) 2365.
13. M Björck and G Andersson, *Journal of Applied Crystallography* **40** (2007) 1174.
14. C Morgan, K Schmalbuch, F García-Sánchez, C M Schneider, and C Meyer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **325** (2013) 112.
15. X Ma, P He, L Ma, G Guo, H Zhao, S Zhou, et al., *Applied Physics Letters* **104** (2014) 192402.
16. W Fan, Z Shi, F Chen, and S Zhou, "Tuning Effects of Spin–Orbit Coupling in L10 Ordered and Disordered FePdPt Films", *Spin* (2015) 1530004.
17. A P Guimarães and A P Guimaraes, "Principles of nanomagnetism" Springer (2009).
18. A Vlachos, S Pappas, V Kapaklis, V Karoutsos, A Kordatos, F Wilhelm, et al., *Journal of nanoscience and nanotechnology* **12** (2012) 6240.
19. A Bollero, V Baltz, L Buda-Prejbeanu, B Rodmacq, and B Dieny, *Physical Review B* **84** (2011) 094423.
20. H Hu, H Chen, S Yu, L Chen, J Chen, and G Wu, *Journal of magnetism and magnetic materials* **299** (2006) 170.
1. E S Leva, R Valente, F M Tabares, M V Mansilla, S Roshdestwensky, and A Butera, *Physical Review B* **82** (2010)144410.
2. M Mulazzi, A Chainani, Y Takata, Y Tanaka, Y Nishino, K Tamasaku, et al., *Physical Review B* **77** (2008) 224425.
3. M Ohtake, S Ouchi, F Kirino, and M Futamoto, *Journal of Applied Physics* **111** (2012) 07A708.
4. M Sedrpooshan, H Ahmadvand, D L González, and S van Dijken, *Physical Review B* **98** (2018) 214444.
5. D Weller, H Brändle, and C Chappert, *Journal of magnetism and magnetic materials* **121** (1993) 461.
6. S Hashimoto, Y Ochiai, and K Aso, *Japanese journal of applied physics* **28** (1989) 1596.
7. B Clark, A Natarajarathinam, Z Tadisina, P Chen, R Shull, and S Gupta, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **436** (2017) 113.
8. M Sedrpooshan, H Ahmadvand, M Ranjbar, and H Salamati, *Physica C: Superconductivity and its Applications* **549** (2018) 122.
9. C Shen, P Yeh, F Yuan, H Chang, M Lee, D Lin, et al., *Surface and Coatings Technology* **350** (2018) 795.
10. G C Hermosa and A C Sun, *AIP Advances* **10** (2020) 015132.
11. J Childress, J Duvail, S Jasmin, A Barthelemy, A