

جفت‌شدگی مغناطیسی در نانولایه های کلید اسپینی با مرز ناهموار

کمالی آشتیانی^۱، محمدجواد^۱؛ حمدی، محمد^۱؛ محسنی، سید مجید^۱

^۱دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده

با توجه به اهمیت جفت‌شدگی مغناطیسی در ساختارهای کلید اسپینی و اهمیت پیدا کردن زبری سطح در مقیاس‌های نانومتری، در این مقاله به بررسی اثر زبری در جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی در این ساختارها پرداخته‌ایم. یک ساختار کلید اسپینی به صورت (فرومغناطیس/غیر مغناطیس/فرومغناطیس) می‌باشد. با در نظر گرفتن انرژی مغناطوستاتیکی ساختار و زبری خود متشابه در مزر بین لایه‌های فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی با اعمال تبدیل فوریه و فرض $w \ll d$ ، (که d و w به ترتیب ضخامت لایه میانی و پهنای زبری مرز مشترک می‌باشد) همبستگی عرضی بین‌شان بدست می‌آید که نشانگر همبستگی دو سطح زبر و در نتیجه جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی دو لایه مغناطیسی است. این جفت‌شدگی نهایتاً به صورت یک تانسور قطری در می‌آید و جفت‌شدگی را در راستاهای مختلف نشان می‌دهد. به عنوان نتیجه اگر این زبری‌ها هم‌فاز باشند جفت‌شدگی پادفرومغناطیس و اگر زبری‌ها غیرهم‌فاز باشند جفت‌شدگی فرومغناطیس باعث کمینه شدن انرژی سیستم می‌شود. منشاء این جفت‌شدگی، چگالی قطب‌های مغناطیسی هستند که روی سطوح لایه مغناطیسی به وجود می‌آیند. نتایج بدست آمده از این پژوهش قابل استفاده در ساخت و طراحی و تولید ادوات اسپینترونیکی و به ویژه کلیدهای اسپینی می‌باشد.

Magnetic Coupling in Spin Valve Nano layers with Rough Interfaces

Kamali Ashtiani, Mohammad Javad¹; Hamdi, Mohammad¹; Mohseni, Seyed Majid¹

¹ Department of Physics, University of Shahid Beheshti, Evin, Tehran

Abstract

Because of the importance of magnetic coupling in spin valves and surface roughness in nano scales, in this paper the effect of roughness on magnetostatic coupling has been investigated. A spin valve structure like (FM/NM/FM) considered with magnetostatic energy of the structure and self-affine roughness between interfaces. By applying Fourier transform and assuming $w \ll d$ (that d and w decipate the spacer thickness and the roughness width), a cross correlation has been obtained which causes a correlation between two interfaces and the coupling between FM layers. Finally, this tensorial coupling constant shows the magnetic coupling in different directions. If the roughnesses of two interfaces be in-phase, AFM coupling is the result and out-of-phase interfaces results the FM coupling. These result is applicable in, design and construction of Spintronics devices specially spin valves.

PACS No. 75

الف) جفت‌شدگی تبدالی غیر مستقیم RKKY که یک اثر کاملاً کوانتومی است و در اثر زبری و در دماهای بالا قدرت آن کاهش می‌یابد [۵]، ب) جفت‌شدگی مغناطیسی مستقیم از طریق حفره‌های موجود در لایه غیر مغناطیسی بین دو لایه مغناطیسی [۶]، ج) جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی ناشی از میدان مغناطیسی حاصل از حوزه‌ها و دیواره‌ها [۷ و ۸]، د) جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی ناشی از زبری سطوح [۹]. جفت‌شدگی‌های مغناطوستاتیکی حاصل برهمکنش مغناطوستاتیکی لایه‌ها هستند، به عبارتی این جفت‌شدگی‌ها به صورت انرژی مغناطوستاتیکی یک لایه در حضور

مقدمه

امروزه کلیدهای اسپینی به دلیل کاربرد گسترده‌شان در صنعت ذخیره‌سازی اطلاعات و حسگرهای مغناطیسی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از طرفی زبری سطح در ساختارهای لایه نازک مغناطیسی و حتی غیرمغناطیسی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، و بر روی خواصی مانند عامل وامغناطش، ساختار حوزه‌های مغناطیسی، مغناطومتقاومت [۴-۱] و به‌طور خاص در این مقاله بر روی جفت‌شدگی تأثیر می‌گذارد. اساساً چهار نوع جفت‌شدگی مغناطیسی در ساختارهای کلید اسپینی وجود دارد که عبارتند از:

میدان مغناطیسی لایه مجاور تعریف میشود و بنابراین منشاء کاملاً کلاسیکی دارند. اولین بار لوییز نیل نوعی جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی را برای سطوح زبر سینوسی همفاز بررسی کرد [۹] که به جفت‌شدگی پوست پرتقالی شهرت یافت. پس از آن ژانگ و وایت [۱۰] و سپس کولز و همکارانش [۱۱] این مدل را کامل‌تر کردند. همچنین شلومن در سال ۱۹۷۰ یک مدل فیزیکی برای یک تک لایه مغناطیسی با حضور زبری سینوسی پیشنهاد داد [۱۲]. او مؤلفه‌های تانسور و امگناطش در صفحه لایه را به صورت

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}, z) = \mathbf{M}_1 s(d_1 + h_1(\mathbf{r}) - z) - s(-z) + \mathbf{M}_2 s(d_1 + d_2 + d_3 - z) - s(d_1 + d_0 + h_2(\mathbf{r}) - z) \quad (1)$$

که در آن \mathbf{M}_1 و \mathbf{M}_2 بردارهای مغناطش لایه‌های او ۱ و ۲ و $s(z)$ تابع پله است. پتانسیل اسکالر مغناطیسی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\psi = \int d\mathbf{r}' \left\{ \frac{\mathbf{M}_{1x} h_{1x}(\mathbf{r}') + \mathbf{M}_{1y} h_{1y}(\mathbf{r}') - \mathbf{M}_{1z}}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + (z - d_1 - h_1(\mathbf{r}'))^2}} - \frac{\mathbf{M}_{2x} h_{2x}(\mathbf{r}') + \mathbf{M}_{2y} h_{2y}(\mathbf{r}') - \mathbf{M}_{2z}}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + (z - d_1 - d_0 - h_2(\mathbf{r}'))^2}} - \frac{\mathbf{M}_{1z}}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + z^2}} - \frac{\mathbf{M}_{2z}}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + (z - (d_1 + d_2 + d_0))^2}} \right\} \quad (2)$$

که $h_{ix}(\mathbf{r})$ و $h_{iy}(\mathbf{r})$ مشتق زبری سطوح نسبت به x, y هستند. انرژی کل مغناطوستاتیکی ساختار [۹] به صورت زیر است:

$$W = -\frac{1}{2} \int_A d\mathbf{r} \int dz \mathbf{H}_M \cdot \mathbf{M} \quad (3)$$

با کمی محاسبات انرژی کل مغناطوستاتیکی ساختار به صورت $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{11} + \mathcal{E}_{22} + \mathcal{E}_{12} + \mathcal{E}_{21}$ به دست می‌آید. \mathcal{E}_{11} و \mathcal{E}_{22} خود انرژی مغناطوستاتیکی لایه‌های ۱ و ۲ هستند [۱۳ و ۱۵] همچنین \mathcal{E}_{12} و \mathcal{E}_{21} انرژی مغناطوستاتیکی لایه ۱ (۲) در حضور لایه مغناطیسی ۲ (۱) هستند. این انرژی‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathcal{E}_{ij} = J_{ij} M_i \quad (4)$$

که در آن J_{ij} تانسور جفت‌شدگی برای لایه i ام در حضور لایه j ام است [۱۵]. در نهایت تانسور جفت‌شدگی کل را برای ساختار مورد نظر به صورت $J = J_{nm}^{12} + J_{nm}^{21}$ تعریف می‌کنیم. مولفه xx تانسور جفت‌شدگی به صورت زیر خواهد بود:

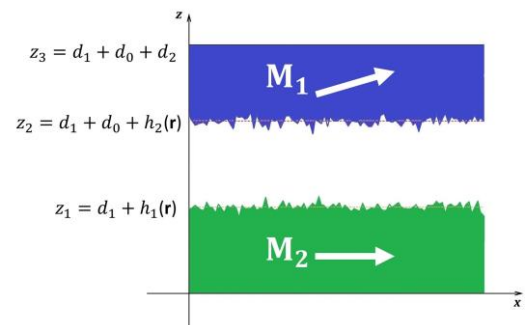
$$J_{xx(yy)} = \frac{1}{4\pi Ad} \int d\mathbf{r} \int d\mathbf{r}' \left\{ \frac{h_{1x}(\mathbf{r}') h_{2x}(\mathbf{r})}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + (d_0 + h_2(\mathbf{r}) - h_1(\mathbf{r}'))^2}} + \frac{h_{2x}(\mathbf{r}') h_{1x}(\mathbf{r})}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 + (d_0 + h_2(\mathbf{r}') - h_1(\mathbf{r}))^2}} \right\} \quad (5)$$

مؤلفه‌های xx و yy به خاطر همسانگرد بودن زبری سطح عبارات مشابهی می‌دهد و مؤلفه zz نیز بدین صورت خواهد بود:

میدان مغناطیسی لایه مجاور تعریف میشود و بنابراین منشاء کاملاً کلاسیکی دارند. اولین بار لوییز نیل نوعی جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی را برای سطوح زبر سینوسی همفاز بررسی کرد [۹] که به جفت‌شدگی پوست پرتقالی شهرت یافت. پس از آن ژانگ و وایت [۱۰] و سپس کولز و همکارانش [۱۱] این مدل را کامل‌تر کردند. همچنین شلومن در سال ۱۹۷۰ یک مدل فیزیکی برای یک تک لایه مغناطیسی با حضور زبری سینوسی پیشنهاد داد [۱۲]. او مؤلفه‌های تانسور و امگناطش در صفحه لایه را به صورت $N_{xx(yy)} \propto a^2 / \lambda$ محاسبه کرد، که در آن λ و a طول موج و دامنه موج سینوسی است. در سال ۱۹۹۹ ژائو و همکارانش این مسئله را در حضور زبری تصادفی تعمیم دادند [۱۳] و این مؤلفه‌ها را به صورت $N_{xx(yy)} \propto w^2 / \xi$ بدست آوردند که در آن w و ξ میانگین مجذوری دامنه زبری و طول همبستگی هستند. مسئله‌ای که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد یک ساختار سه لایه‌ای است. به طوری که یک لایه غیرمغناطیسی میان دو لایه فرومغناطیسی ساندویچ شده است، در مرزها به طور معمول نوعی از زبری وجود دارد، که این زبری منشأ به وجود آمدن نوعی جفت‌شدگی مغناطوستاتیکی بین دو لایه فرومغناطیس است.

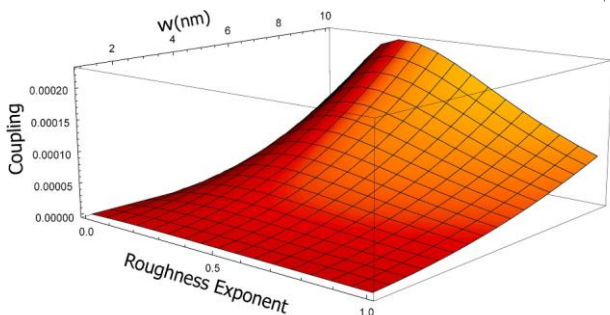
توصیف مدل و فرمول‌بندی

همان‌طور که اشاره شد جفت‌شدگی‌های مغناطوستاتیکی منشاء کلاسیک دارند و بنابراین در این مقاله تمام محاسبات بر مبنای مغناطوستاتیک کلاسیک است. در شکل (۱) نمایی از ساختار بررسی شده آورده شده است. مغناطش لایه‌های مغناطیسی یکنواخت و تک‌حوزه فرض شده‌اند. \mathbf{M}_1 و \mathbf{M}_2 بردارهای مغناطش در لایه‌های مغناطیسی هستند و جهت‌گیری دلخواه دارند.

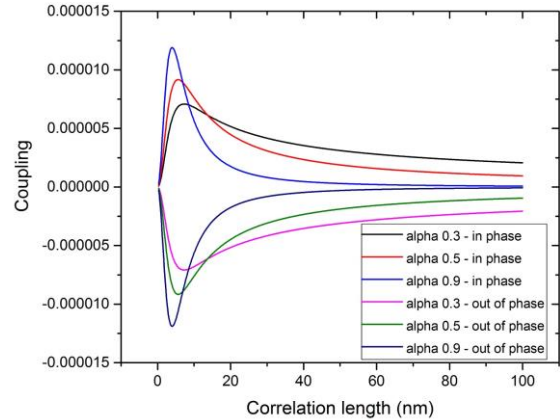


شکل ۱: نمای عرضی یک سه لایه‌ای مغناطیسی

$k_c = 21/93$ (a) ثابت شبکه است و k_c بردار موج در شبکه وارون با رابطه $k_c = 2\pi/a$ (است) حساب می‌کنیم. در نمودار شکل (۲) با افزایش طول همبستگی جفت‌شدگی افزایش می‌یابد، یک طول همبستگی مشخصه‌ای مثل ξ_c به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و سپس رفتار کاهشی دارد، که نشان می‌دهد یک طول همبستگی خاص بیش‌ترین خطوط میدان را تولید می‌کند و ماکزیمم جفت‌شدگی را می‌دهد؛ برای طول همبستگی‌های کوچک‌تر مساحت سطح زیادتر شده و هنگامی که این طول همبستگی افزایش می‌یابد چگالی قطب‌های مغناطیسی روی سطح کاهش می‌یابد. در شکل (۳) با افزایش نمای زبری، ظاهر سطح نرم‌تر می‌شود و جفت‌شدگی کاهش می‌یابد، اما در α های کوچک‌تر از حدود ۰/۳ در یک α_c ماکزیمم جفت‌شدگی به وجود آمده است. اگر $\alpha \rightarrow 0$ افت و خیزهای ریز سطح خیلی زیاد می‌شود و اگر $\alpha \rightarrow 1$ سطح نرم‌تر و آرام‌تر است، لذا چگالی قطب‌های مغناطیسی کاهش یافته‌اند. افزایش جفت‌شدگی با افزایش توان دوم پهنای زبری نشان داده شده است، و به عبارتی دامنه زبری است، هر چه این دامنه افزایش یابد گویی نوسانات ناگهانی افزایش می‌یابد. در نمودار شکل (۴) جفت‌شدگی به صورت $1/d$ کاهش می‌یابد که در این مورد قابل تأمل است و می‌توان دریافت خطوط میدان تولید شده دوربرد نیستند. نتایج تجربی بدست آمده تأییدی از این رفتار است [۱۴]. در رابطه (۱۰) اگر $J > 0$ برای کمینگی انرژی می‌بایست حاصل $\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2$ منفی شود یعنی مغناطش دو لایه نسبت به هم جهت‌گیری مخالف دارند (جفت‌شدگی پاد فرومغناطیس) شکل (۵-الف). اگر $J < 0$ برای کمینگی انرژی باید حاصل $\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2$ مثبت شود. یعنی مغناطش دو لایه نسبت به هم جهت‌گیری موازی دارند.



شکل ۳: تغییرات جفت‌شدگی بر حسب پهنای زبری w و نمای زبری α



شکل ۲: تغییرات جفت‌شدگی بر حسب تغییرات طول همبستگی (بالای محور X و پایین آن نشان دهنده حالت همفاز و خارج از فاز است)

$$J_{zz} = \frac{1}{2\pi Ad} \int d\mathbf{r} \int d\mathbf{r}' \left\{ \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{r}-\mathbf{r}')^2 + (d_0 + d_2)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{r}-\mathbf{r}')^2 + d_0^2}} \right\} \quad (6)$$

به منظور یافتن مقدار دقیق مؤلفه جفت‌شدگی تبدیل فوریه زیر را به کار می‌بریم:

$$\tilde{h}_i(\mathbf{k}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int h_i(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r} \quad (7)$$

$$h_i(\mathbf{r}) = \int \tilde{h}_i(\mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{k}$$

و با استفاده از ناوردایی انتقالی برای سطوح زبر [۱۳] و محاسبه همبستگی عرضی، آن را ساده می‌کنیم. برای زبری همفاز مرزها $h_1 = h_2$ و زبری خارج از فاز $h_1 = -h_2$ در نظر می‌گیریم. برای راستای X داریم:

$$J_{xx} = \frac{(2\pi)^4 \pi}{2dA} \int dk k^2 e^{-d_0 k} \left\{ \pm 2 \left\langle |\tilde{h}_i(\mathbf{k})|^2 \right\rangle \right\} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن یک سطح زبر خود متشابه به صورت زیر داریم:

$$\left\langle |\tilde{h}_i(\mathbf{k})|^2 \right\rangle = \frac{A}{(2\pi)^5} \frac{\alpha \xi^2 w^2}{(1 + \xi^2 k^2)^{1+\alpha}} \quad (9)$$

و نهایتاً با جایگذاری آن در رابطه (۸) خواهیم داشت:

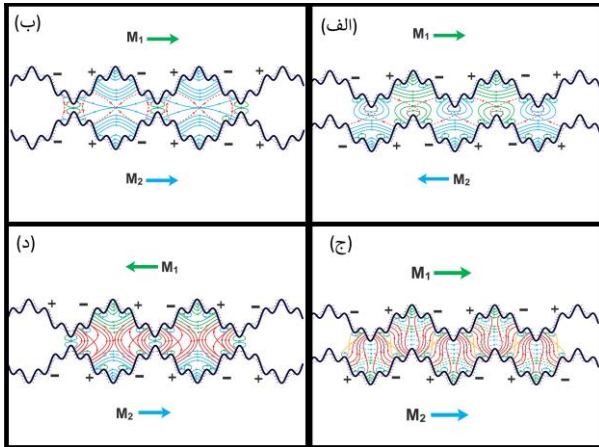
$$(10)$$

$$J_{xx} = \pm \frac{\alpha w^2 k_c}{4d} \int_0^{k_c} dk \frac{k^2 \xi^2}{(1 + \xi^2 k^2)^{1+\alpha}} e^{-d_0 k}$$

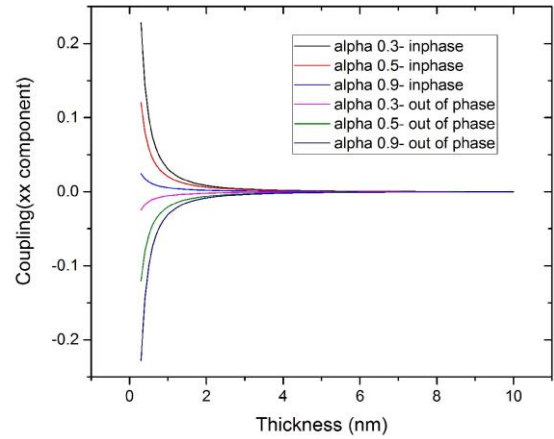
که در آن علامت \pm (علامت مثبت برای همفاز و علامت منفی برای غیر هم فاز) نشان دهنده جفت‌شدگی فرومغناطیس یا پادفرومغناطیس دو لایه مغناطیسی نسبت به هم می‌باشد.

بحث و تحلیل نتایج

انتگرال رابطه (۱۰) را به صورت عددی برای ساختار Co/Cu/Co با احتساب $a_{Cu} = 2/50 \text{ \AA}$ و $a_{Co} = 2/48 \text{ \AA}$



شکل ۵: (الف) و (ب) خطوط میدان برای حالت‌هایی با کمینه انرژی جفت‌شدگی. (ج) و (د) خطوط میدان برای حالت‌هایی با بیشترین انرژی جفت‌شدگی.



شکل ۴: تغییرات جفت‌شدگی بر حسب ضخامت جداکننده

شکل (۵-ب)، (جفت‌شدگی پاد فرومغناطیس). حالت هم‌فاز تعمیم جفت‌شدگی پوست پرتقالی است. در این دو حالت بارهای سطحی هم‌نام مقابل هم قرار می‌گیرند که منجر به تولید خطوطی می‌شود که از هر لایه فرومغناطیس به خودش باز می‌گردد و اثرات میدان مغناطیسی لایه مقابل روی لایه دیگر کم‌تر است، لذا سیستم تعادل مغناطیسی خود را حفظ کرده و سعی می‌کند خطوط میدان بسته را تشکیل دهد. در شکل (۵-ج) و شکل (۵-د) بیش‌ترین خطوط جفت‌شدگی ظاهر می‌شود، چرا که بار مغناطیسی سطحی تولید شده با علامت مخالف رو به روی هم قرار می‌گیرند. این حالت‌های جفت‌شدگی بر میدانی که هر لایه روی خودش ایجاد می‌کند، غلبه دارد و حالتی نیست که سیستم بخواهد خود به خود آن را ترجیح دهد.

نتیجه گیری

با مقایسه رابطه (۷) و رابطه جفت‌شدگی مطرح شده توسط نیل به صورت زیر [۱۱]:

$$J = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{h^2}{\lambda} (\mu_0 M_F M_P) e^{-\frac{2\pi\sqrt{2}t_{spacer}}{\lambda}} \quad (10)$$

که در آن رابطه $k = 2\pi/\lambda$ است؛ در می‌یابیم که مدل ارائه شده در توافق خوبی با مدل نیل است و برتری آن این است که نه تنها برای سطوح زبر سینوسی بلکه برای سطوح زبر خود متناسب و همچنین تمامی مدل‌های سطوح زبر دلخواه کاربرد دارد. از آنجا که این جفت‌شدگی مستقل از نوع ماده جدا کننده است، عمومیت فراوانی داشته و نتایج آن می‌تواند در بررسی پدیده‌های مختلف مغناطومقاومت مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع‌ها

- [1] B. Heinrich and J. A. C. Bland, *Ultrathin Magnetic Structures II*, vol. 1. Springer, 1994.
- [2] J. A. C. Bland and B. Heinrich, *Ultrathin Magnetic Structures I: An Introduction to the Electronic, Magnetic and Structural Properties*, vol. 1. Springer Science & Business Media, 2006.
- [3] P. Bruno, G. Bayreuther, P. Beauvillain, C. Chappert, G. Lugert, D. Renard, J. P. Renard, and J. Seiden, "Hysteresis properties of ultrathin ferromagnetic films," *J. Appl. Phys.*, vol. 68, no. 11, pp. 5759–5766, 1990.
- [4] C.-H. Chang and M. H. Kryder, "Effect of substrate roughness on microstructure, uniaxial anisotropy, and coercivity of Co/Pt multilayer thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 75, no. 10, pp. 6864–6866, 1994.
- [5] Teixeira J M, Ventura J, Fermento R, Araújo J P, Sousa J B, Cardoso S and Freitas P P 2008 *J. Appl. Phys.* 103 07F319
- [6] Wang J, Liu Y, Freitas P P, Snoeck E and Martins J L 2003 *J. Appl. Phys.* 93 83367
- [7] Mohseni, S. M., et al. "Temperature-dependent interlayer coupling in Ni/Co perpendicular pseudo-spin-valve structures." *Physical Review B* 84.17 (2011): 174432.
- [8] Mohseni, S. M., et al. "Magnetostatically driven domain replication in Ni/Co based perpendicular pseudo-spin-valves." *Journal of Physics D: Applied Physics* 49.41 (2016): 415004
- [9] L. Neel, "A new method of coupling the magnetization of two thin ferromagnetic films," *Acad. Sci., Paris*, p. 1676, 1962.
- [10] J. Zhang and R. M. White, "Topological coupling in spin valve type multilayers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 4630–4635, 1996.
- [11] J. C. S. Kools, W. Kula, D. Mauri, and T. Lin, "Effect of finite magnetic film thickness on N{ε} coupling in spin valves," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 8, pp. 4466–4468, 1999.
- [12] E. Schlömann, "Demagnetizing fields in thin magnetic films due to surface roughness," *J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 4, pp. 1617–1622, 1970.
- [13] Y.-P. Zhao, G. Palasantzas, G.-C. Wang, and J. T. M. De Hosson, "Surface/interface-roughness-induced demagnetizing effect in thin magnetic films," *Phys. Rev. B*, vol. 60, no. 2, pp. 1216–1226, Jul. 1999.
- [14] D. C. Parks, P. J. Chen, W. F. Egelhoff Jr, and R. D. Gomez, "Interfacial roughness effects on interlayer coupling in spin valves grown on different seed layers," *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 6, pp. 3023–3026, 2000.

[۱۵] کمالی آشتیانی، م. ج؛ "جفت‌شدگی مغناطیسی در نانولایه‌های کلید اسپینی با مرز ناهموار"، شهید بهشتی، تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۵.