

## حرکت دیواره مغناطیسی ناشی از جریان در مواد مغناطیسی با ناهمسانگردی درون صفحه:

### نقش اثر اسپینی هال

حاجی علی، محمدرضا<sup>۱</sup>؛ حمدی، محمد<sup>۲</sup>؛ محسنی، سید مجید<sup>۲</sup>؛ روزمه، احسان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

### چکیده

در این مقاله دینامیک دیواره حوزه مغناطیسی ناشی از جریان القایی در نانو نوار دولایه‌ای فرومغناطیس و غیرمغناطیس با جفت‌شدگی اسپین-مدار به صورت تئوری مورد مطالعه قرار گرفته است. برای توصیف حرکت دیواره حوزه از حل کلی معادله لانداو-لیفشیتز-گیلبرت شامل گشتاور اسپینی آدیاباتیکی، غیرآدیاباتیکی و گشتاور ناشی از اثر اسپینی هال استفاده شده است. ما نشان دادیم که یک جریان مستقیم به حرکت دیواره مغناطیسی کمک می‌کند و حرکت دیواره مغناطیسی به طور قابل توجهی تحت تاثیر اثر اسپینی هال قرار می‌گیرد. نتایج ما نشان می‌دهد که با استفاده از کنترل اثر اسپینی هال یک دست‌یافت مهم برای عملکرد موثر دستگاه‌های اسپینترونیک فراهم می‌شود.

## Current- induced domain-wall motion in magnetic materials with in-plane magnetic anisotropy: The role of the spin Hall effect

Mohammadreza, Hajiali<sup>1,2</sup>; Hamdi, Mohammad<sup>2</sup>; Mohseni, Seyed Majid<sup>2</sup>; Roozmeh, Ehsan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

<sup>2</sup> Faculty of Physics, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

### Abstract

*In this paper, current-induced dynamics of a transverse magnetic domain wall in bi-layer nanowires consisting of a ferromagnetic layer on top of a nonmagnetic layer with strong spin-orbit coupling is studied theoretically. The solution of the generalized Landau-Lifshitz-Gilbert equation including adiabatic, and nonadiabatic spin torque and spin Hall effect torque is used to describe motion of the domain wall. We demonstrate that dc current facilitates the manipulation of the domain wall and domain wall dynamics is significantly affected by the spin Hall effect. Our result demonstrates that the engineering of spin Hall effect provides an important opportunity for an efficient operation of spintronic devices.*

PACS No. 75

### مقدمه

اسپینی است قابل درک می‌شود [۱]. تاکنون مطالعات متعددی روی فیزیک بنیادی این موضوع و کاربرد آن در مورد ذخیره‌سازی اطلاعات صورت گرفته است [۲]. به هر حال اغلب مطالعات روی اثر جریان قطبیده اسپینی که به وسیله‌ی ماده فرومغناطیسی تولید می‌شود تمرکز کرده‌اند. راه دیگر برای تولید جریان اسپینی، اثر هال

اخیراً تغییر حرکت دیواره‌های مغناطیسی (DWs) در نانو نوارهای مغناطیسی با استفاده از جریان الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع با مفهوم گشتاور انتقالی اسپینی<sup>۲</sup> (STT) که ناشی از جفت‌شدگی بین مغناطش در DWs و جریان‌های قطبیده

انرژی تبادل، انرژی ناهمسانگردی و انرژی و امغانایدگی است که در مختصات  $\theta$  و  $\varphi$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$w = A \left[ \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left( \sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 \right] + K \sin^2 \theta + K_d \sin^2 \theta \sin^2 \varphi \quad (2)$$

که  $A$  ضریب سختی تبدیلی،  $K$  ثابت ناهمسانگردی محور آسان<sup>۵</sup> و  $K_d$  ثابت ناهمسانگردی محور سخت<sup>۶</sup> است. مشخصات فضایی مغناطش به صورت زیر توصیف می‌شود  $m = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$  معادله (۱) با توجه به زوایای  $\theta$  و  $\varphi$  به دو معادله‌ی جفت شده زیر تبدیل می‌شود:

$$\dot{\theta} + \alpha \dot{\varphi} \sin \theta = -\frac{\gamma}{M_s} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\delta w}{\delta \varphi} + b_J \frac{\partial \theta}{\partial x} + \beta b_J \sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \theta_{SH} c_J \cos \theta \cos \varphi \quad (3)$$

$$\dot{\varphi} \sin \theta - \alpha \dot{\theta} = \frac{\gamma}{M_s} \frac{\delta w}{\delta \theta} + b_J \sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \beta b_J \frac{\partial \theta}{\partial x} - \theta_{SH} c_J \sin \varphi \quad (4)$$

که در آن از روابط زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = \dot{\theta} \hat{\theta} + \dot{\varphi} \sin \theta \hat{\varphi} \quad (5)$$

$$\frac{\delta w}{\delta \mathbf{m}} = \frac{\delta w}{\delta \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\delta w}{\delta \varphi} \hat{\varphi} \quad (6)$$

ساختار دینامیکی دیواره به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$\theta(x, t) = 2 \arctan \left[ \exp \left( \frac{x - q(t)}{\Delta(t)} \right) \right] \quad (7)$$

$$\varphi(x, t) = \phi(t) \quad (8)$$

که  $\Delta(t)$  عرض دیواره و  $q(t)$  مختصات جابه‌جایی دیواره است. به طور کلی تغییرات  $\Delta(t)$  نسبت به  $q(t)$  خیلی کم است یعنی

اسپینی<sup>۳</sup> (SHE) [۳ و ۴] است. در سیستم‌های دو لایه‌ای فرومغناطیس (FM) / غیرمغناطیس (NM) هنگامی که یک چگالی جریان بار ( $J_c$ ) درون صفحه از NM عبور کند، این جریان با توجه به اثر اسپینی هال به چگالی جریان اسپینی ( $J_s$ ) عمود به صفحه تبدیل می‌شود. نسبت  $J_s$  به  $J_c$  یعنی چه مقدار از جریان بار به جریان اسپینی تبدیل می‌شود به زاویه‌ی اسپینی هال معروف است. معمولاً فلزات سنگین مانند پلاتین و پالادیوم به خاطر داشتن برهمکنش اسپین-مدار قوی گزینه خوبی برای تولید جریان اسپینی هستند. این جریان اسپینی که به وسیله‌ی SHE تولید می‌شود، یک STT (SHE-STT) روی FM اعمال می‌کند [۵ و ۶] و در نتیجه دینامیک مغناطش تغییر می‌کند. در این مقاله دینامیک DW در نانوارهای شامل FM/NM (شکل ۱)، که در آن FM دارای ناهمسانگردی مغناطیسی درون صفحه و NM دارای جفت‌شدگی اسپین-مدار قوی (که مسئول تولید جریان اسپینی با توجه به SHE است) مورد بررسی قرار گرفته است. یک جریان بار عبوری از FM گشتاور انتقالی اسپینی مرسوم آدیباتیک و غیرآدیباتیک را تولید می‌کند [۷ و ۸]، در حالی که جریان عبوری از NM اثر SHE را تجربه می‌کند و باعث تولید SHE-STT بر روی FM می‌شود. با فرض اینکه جهت جریان در راستای محور  $x$  باشد معادله‌ی لاندائو-لیفشیتز-گیلبرت<sup>۴</sup> (LLG) شامل تمام STTs به صورت زیر داده می‌شود:

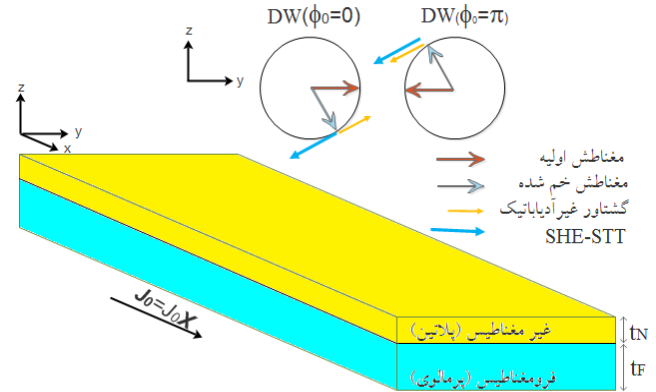
$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} - b_J \times \left( \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} \right) - \beta b_J \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} - \theta_{SH} c_J \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \hat{y}) \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{m}$  بردار واحد در امتداد مغناطش،  $\alpha$  ثابت دمپینگ گیلبرت،  $b_J = g \mu_B P J_F / 2e M_s$  بزرگی STT آدیباتیک،  $\beta$  گشتاور انتقال اسپینی غیرآدیباتیک،  $\theta_{SH} = J_N \gamma \hbar \theta_{SH} / 2e M_s t_F$  بزرگی SHE-STT،  $\theta_{SH}$  زاویه‌ی اسپینی هال برای سیستم دو لایه‌ای،  $\gamma$  ثابت ژیرومغناطیس،  $g$  فاکتور لاندائو،  $\mu_B$  مگنتون بوهر،  $P$  قطبش اسپینی در FM،  $e$  بار الکترون،  $M_s$  مغناطش اشباع FM،  $J_F$  ( $J_N$ ) چگالی جریان FM(NM)، و  $\mathbf{H}_{eff} = \frac{1}{M_s} \frac{\delta w}{\delta \mathbf{m}}$  که چگالی انرژی، و شامل

بالای حد تفکیک والکر<sup>۷</sup>. در حد پایین تفکیک والکر هنگامی که  $t \rightarrow \infty$  داریم  $\dot{\phi} = 0$ ، و با استفاده از تقریب زاویه کوچک  $(\cos \phi = \pm 1)$  برای سرعت DW داریم:

$$v_{DW} = -\frac{\beta}{\alpha} b_J (1 \pm B_{SH} \frac{(\alpha - \beta) b_J}{\gamma \alpha H_d \pm \beta b_J B_{SH}}) \quad (12)$$

کایرالیته<sup>۸</sup> DW با توجه به شکل (۱) به وسیله  $\phi_0 = 0$  و  $\pi$  مشخص می شود. ابتدا فرض می کنیم که SHE-STT وجود ندارد. برای هر دو کایرالیته DW، مغناطش در مرکز DW در جهت عقربه های ساعت کج می شود که این کج شدن ناشی از همه گشتاورها به غیر از SHE-STT است. حال اثر SHE-STT را در نظر می گیریم، برای مورد  $\phi_0 = 0$  جهت گشتاور غیر آدیاباتیکی خلاف جهت SHE-STT است، بنابراین هنگامی که SHE-STT بتواند بر گشتاور غیر آدیاباتیکی غلبه کند، DW می تواند خلاف جهت جریان حرکت کند. در مقابل برای مورد  $\phi_0 = \pi$  جهت گشتاور غیر آدیاباتیکی و SHE-STT یکسان است بنابراین DW همیشه در جهت جریان حرکت می کند. در نتیجه با توجه به کایرالیته DW، SHE-STT می تواند مانند جمله دمپینگ و آنتی دمپینگ بر روی مغناطش اثر بگذارد. توجه کنید که در علامت گذاری ما یک مقدار منفی  $b_J$  متناظر است با جریان الکترون در جهت +x، و یک سرعت DW مثبت متناظر است با حرکت DW در جهت جریان الکترون است. بنابراین، هنگامی که جمله داخل پرانتز معادله (۱۲) منفی است، حرکت DW به جای اینکه در امتداد جریان الکترون باشد در خلاف جهت آن است. شکل (۲) و (۳) رسم معادله (۱۲) برای دو حالت  $\alpha > \beta$  و  $\alpha < \beta$  است. با توجه به شکل، هنگامی که SHE وجود نداشته باشد رابطه سرعت DW با چگالی جریان خطی است. هنگامی که SHE وجود دارد سرعت DW به مقدار چشمگیری تغییر می کند. در مورد خاص  $\alpha = \beta$  سرعت DW برابر  $-b_J$  می شود در نتیجه سرعت DW مستقل از SHE-STT می شود. در اینجا اثر میدان اورستد که توسط جریان اعمالی تولید می شود نادیده گرفته شده است. نکته مهم دیگر مقدار جریان آستانه برای معکوس شدن حرکت DW است. با توجه به



شکل ۱: شماتیکی از ساختار دو لایه ای فرومغناطیس/غیرمغناطیس

هنگامی که دیواره حوزه در حال حرکت است اعوجاج عرض دیواره نسبت به زمان خیلی کوچک است،  $|\dot{\Delta}| \ll |\dot{q}|$ .

بنابراین از معادله (۵) می توان روابط مفید زیر را بدست آورد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\sin \theta}{\Delta}; \delta \theta = -\frac{\sin \theta}{\Delta} dq; \dot{\theta} = -\frac{\dot{q} \sin \theta}{\Delta} \quad (9)$$

با قرار دادن معادلات (۷ و ۸) در معادلات (۳ و ۴) و با استفاده از روابط (۹) معادلات حرکت دیواره حوزه برای دو مختصات  $q$  و  $\phi$  بدست می آیند.

$$-\dot{q} + \alpha \Delta \dot{\phi} = b_J - \frac{\gamma H_d \Delta}{2} \sin(2\phi) \quad (10)$$

$$\Delta \dot{\phi} + \alpha \dot{q} = -\beta b_J (1 + B_{SH} \Delta \sin \phi) \quad (11)$$

که  $H_d = \frac{2K_d}{M_s}$  و  $B_{SH} = \frac{\pi \theta_{SH} J_N}{2 \beta t_F P}$  و  $t_F$  ضخامت لایه فرومغناطیس است. فرض می کنیم که FM، پرمالوی باشد (Py: Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>) و NM، پلاتین (Pt) باشد، برای پارامترهای  $\theta_{SH} = 0.1$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $P = 0.1$ ,  $t_F = 4 \text{ nm}$ ,  $t_N = 3 \text{ nm}$ ,  $\Delta = 3 \text{ nm}$  مقدار  $B_{SH} \Delta$  تقریباً برابر ۵۶-۱۸ بدست می آید که مقدار کوچکی نیست. برای یک دید مناسب از اثر SHE-STT روی دینامیک DW باید جواب های معادله (۱۰) و (۱۱) را بدست آوریم. دینامیک DW در نانوارها می تواند به دو دسته تقسیم بندی شود، پایین و

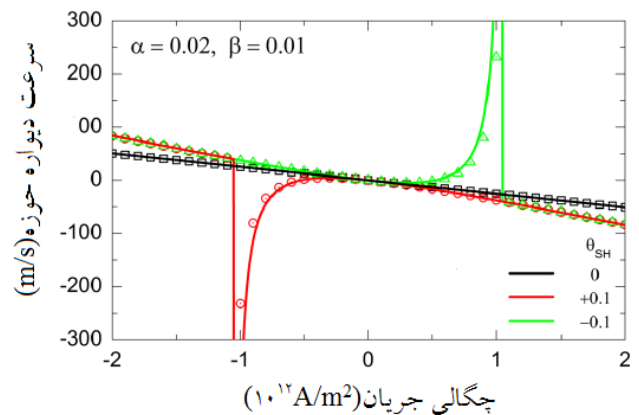
اثر اسپینی هال یک دست یافت مهم برای عملکرد موثر دستگاه‌های اسپینترونیکی فراهم می‌شود.

### مرجع‌ها

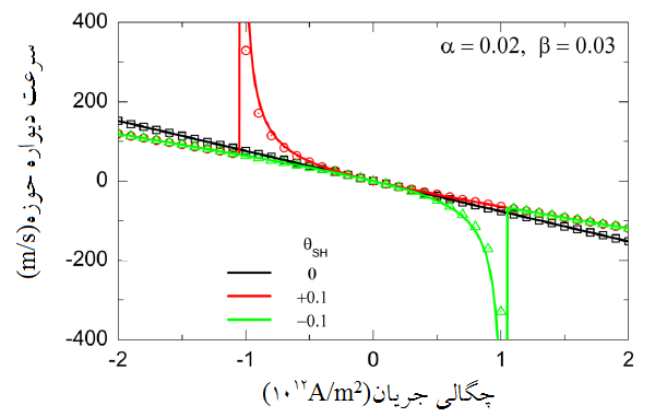
- [۱] J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).  
 [۲] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* **320**, 190 (2008).  
 [۳] J. E. Hirsch, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1834 (1999).  
 [۴] Jairo Sinova, Sergio O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, T. Jungwirth, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 1213 (2015).  
 [۵] Haazen, P. P. J. et al. *Nature Mater.* **12**, 299–303 (2013).  
 [۶] Emori, S. et al. *Nature Mater.* **12**, 611–616 (2013).  
 [۷] G. Tatara and H. Kohno, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 086601 (2004).  
 [۸] S. Zhang and Z. Li, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 127204 (2004).  
 [۹] N. L. Schryer and L. R. Walker, *J. Appl. Phys.* **45**, 5406 (1974).

°Domain Wall	°Easy- Axis
°Spin Transfer Torque	°Hard-Axis
°Spin Hall Effect	°Walker Breakdown
°Landau-Lifshitz-Gilbert	°Chirality

شکل (۲) این مقدار جریان  $10^{-12} \times 0.52$  آمپر بر مترمربع است. ولی در شکل (۳) که مربوط به شرط  $\alpha > \beta$  است، حرکت DW در هیچ جریانی معکوس نمی‌شود، زیرا علامت جمله  $(\alpha - \beta)$  در معادله (۱۲) منفی است. بنابراین وقتی شرط  $\alpha > \beta$  برقرار باشد، SHE می‌تواند حرکت دیواره حوزه را معکوس کند.



شکل ۲: سرعت دیواره حوزه به صورت تابعی از چگالی جریان در ساختار دو لایه‌ای برای سه مقدار  $\theta_{SH}$  و  $\alpha > \beta$ .



شکل ۳: سرعت دیواره حوزه به صورت تابعی از چگالی جریان در ساختار دو لایه‌ای برای سه مقدار  $\theta_{SH}$  و  $\alpha < \beta$ .

### نتیجه گیری

تئوری حرکت دیواره حوزه ناشی از جریان القایی در حضور اثر اسپینی حال مورد بررسی قرار گرفت. نشان دادیم که دینامیک دیواره حوزه در فرومغناطیس به طور چشمگیری از اثر اسپینی هال تاثیر می‌پذیرد، به ویژه برای مورد  $\alpha > \beta$  که SHE قادر است حرکت دیواره حوزه را معکوس کند. نتایج ما نشان می‌دهد که با استفاده از کنترل