

داراپلت مغناطیسی سالیوتونی در ساختار دریچه اسپینی با ناهمسانگردی مغناطیسی عمود به صفحه

فالیزکاران یزدی، حسین^۱؛ محسنی، سید مرتضی^۱؛ حمدی، محمد^۱؛ محسنی، سید مجید^۱

^۱دانشگاه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده

در این پژوهش چگونگی تشکیل و دینامیک نوعی از امواج سالیوتونی اسپینی موسوم به داراپلت مغناطیسی سالیوتونی در ساختارهای دریچه اسپینی با ناهمسانگردی مغناطیسی عمود به صفحه بر پایه معادله دینامیک مغناطش بررسی شده است. شبیه سازی عددی تشکیل این نوع امواج مغناطیسی با استفاده شرایط مرزی تشکیل داراپلت مغناطیسی سالیوتونی در محیط MuMax انجام گردید و دینامیک مولفه های مغناطش شبیه سازی شده پس از تشکیل این امواج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی مویید تشکیل داراپلت مغناطیسی سالیوتونی و نوسان داراپلت مغناطیسی سالیوتونی در فرکانس پایین تر از فرکانس تشدید فرومغناطیس است که با گزارشات نظری تطابق خوبی دارد. نتایج به دست آمده در این گزارش دارای کاربرد در حوزه اسپیترونیک و ادوات مگنونیک همچون سیستم های مخابرات مگنونی است.

Magnetic droplet soliton in spin valve with perpendicular magnetic anisotropy

Falizkaran Yazdi, Hossein¹; Mohseni, Seyed Morteza¹; Hamdi, Mohammad¹; Mohseni, Seyed Majid¹

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

Abstract

In this paper, we report on the dynamic and nucleation of a specific solitonic spin waves, known as magnetic droplet solitons in spin valve structures with perpendicular magnetic anisotropy. Numerical simulation performed based on magneto dynamic equation with droplet nucleation boundaries taken into account using MuMax framework. Simulation results show magnetic droplet solitons formation in the frequency lower than ferromagnetic resonance frequency, which is well consistent with previously reported theoretical works. Our results are capable of implementation in applied spintronics and magnonics such as magnonic communication systems.

PACS No. 75.00.,91.10

می توان امواج اسپینی را تولید، کنترل و از آنها در کاربردهای مخابراتی استفاده نمود.

تحریک ناشی از گشتاور انتقالی اسپینی^۲ (STT) در سیستم های مغناطیسی به دلیل خواص جالب برای فناوری های نوین کاربردهای بسیاری پیدا کرده است به طوری که تا کنون امواج اسپینی متفاوتی همچون امواج انتشاری [۲]، امواج سالیوتونی ایستا موسوم به بولت [۳] و امواج گردابی [۴] مشاهده و گزارش شده است. داراپلت مغناطیسی سالیوتونی نوعی از امواج سالیوتونی است که در

مقدمه

انتشار و بهره گیری از امواج اسپینی^۱ در ساختارهای مغناطیسی به جهت کاربرد در پردازش و انتقال اطلاعات، الکترونیک سریع خصوصا به دلیل انتشار بدون اتلاف اهمی آنها در مواد فرومغناطیس، در چند سال گذشته توجهات ویژه ای را به خود اختصاص داده است [۱]. یکی از المان های مهم در این زمینه، نانو نوسانگرهای گشتاور اسپینی در ساختارهای دریچه اسپینی می باشد که با بهره گیری از جریان DC و به صورت کنترل پذیر،

² Spin transfer torque

¹ Spin wave

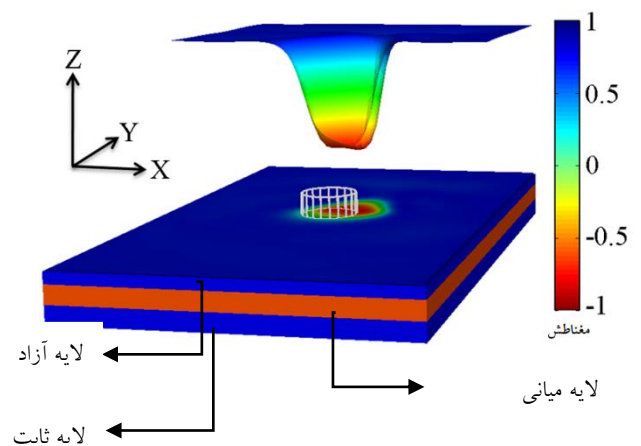
با استفاده از مواد مغناطیسی با ناهمسانگردی مغناطیسی عمود به صفحه در لایه آزاد می‌توان علاوه بر ایجاد نوسان دراپلت های مغناطیسی سالیتمونی را ایجاد کرد [۵]. دراپلت مغناطیسی اولین بار در سال ۱۹۷۰ به عنوان امواج اسپینی قطره گونه پیش بینی شد و در سال ۲۰۱۰ توسط مارک هوفر به صورت تئوری کاملاً مطالعه شد [۵]. دراپلت مغناطیسی در سال ۲۰۱۳ برای اولین بار توسط محسنی مشاهده شد [۷]. ما در اینجا با استفاده از شبیه سازی میکرو مغناطیسی، چگونگی تشکیل دراپلت در دریاچه ها اسپینی با ناهمسانگردی مغناطیسی عمود به صفحه را با استفاده از نرم افزار متن باز MUMAX3 بررسی می‌کنیم.

دراپلت یک مد دو بعدی غیرتوپولوژیکی است که به دلیل گشتاور ایجاد شده توسط STT در جهت عکس میرایی گیلبرت در شرایط تعادل شده بهره (STT)-اتلاف (میرایی گیلبرت) در محدوده نانواتصال به وجود می‌آید. در ناحیه تشکیل دراپلت، مغناطش نانواتصال در لایه آزاد کاملاً معکوس شده و حول این ناحیه نیز مغناطش نوسان می‌کند (شکل ۱). این مرز ها سایز دراپلت را مشخص می‌کند. تشکیل دراپلت طی یک فرآیند دینامیکی غیر خطی پیچیده است، که می‌توان این ویژگی پیچیده را با شبیه سازی میکرومغناطیسی مطالعه کرد.

تئوری

با استفاده از معادله لاندائوشیفتز گیلبرت اسلونچوسکی (معادله ۱) چگونگی تشکیل دراپلت را توضیح می‌دهیم [۵]. جمله اول این معادله ترم نوسانی لارمور است که بیان می‌کند وقتی یک دوقطبی مغناطیسی با مغناطش M در یک میدان H قرار می‌گیرد با فرکانس ثابت حول میدان خارجی نوسان می‌کند. جمله دوم سوق دوقطبی مغناطیسی را به سمت هم راستا شدن با میدان خارجی را به دلیل وجود میرایی ذاتی موسوم به میرایی گیلبرت توضیح می‌دهد. جمله آخرین (اسلونزفسکی) اثر جریان پلاریزه شده توسط لایه ثابت در لایه آزاد را توضیح می‌دهد. دو جمله آخر در این معادله هم راستا هستند. در واقع جمله سوم مکانیسم میرایی مغناطیسی را به نسبت مقدار و علامت تحت تاثیر قرار می‌دهد. اگر هم علامت با جمله دوم باشد سرعت میرایی در جهت میدان را افزایش می‌دهد. اگر هم اندازه و با علامت مخالف این جمله

ساختارهای دریاچه اسپینی با ناهمسانگردی عمود به صفحه به وجود می‌آید [۵]. به صورت بنیادی، STT را به دو صورت می‌توان مشاهده کرد: ۱- جریان اسپین پلاریزه شده ای که از یک لایه نازک فرومغناطیس عبور می‌کند و روی ممان های مغناطیسی لایه گشتاور اسپینی ایجاد می‌کند ۲- شارش جریان اسپین پلاریزه از یک لایه فرومغناطیس به لایه دوم فرومغناطیس و ایجاد نوع اول STT در ساختارهای دریاچه مغناطیسی و یا پیوندهای تونلی مغناطیسی [۶]. دریاچه های اسپینی که ساختار مورد مطالعه در این پژوهش است، از دو لایه مغناطیسی و یک لایه میانی غیر مغناطیسی فلزی تشکیل شده است. یکی از لایه های فرومغناطیسی با استفاده از همجواری یک لایه با داشتن میدان وادارندگی زیادتر به عنوان لایه ثابت (Fixed Layer) در نظر گرفته می‌شود که جریان مستقیم (DC) را اسپین پلاریزه می‌کند. لایه دوم مغناطیسی موسوم به لایه آزاد (Free Layer) است که در آن به واسطه شارش الکترونیهای اسپین پلاریزه در لایه ثابت، STT ایجاد می‌شود. برای ایجاد یک چگالی جریان زیاد با استفاده از تکنیک های نانوفناوری، یک نانو اتصال (NC) ^۳ در ساختار ایجاد می‌شود. با عبور جریان الکترونی اسپین پلاریزه از لایه ثابت به لایه آزاد، به دلیل بار منفی الکترون جهت جریان $-Z$ است، از طریق نانو اتصال و به دلیل ایجاد گشتاور اسپینی یک حرکت نوسانی در لایه آزاد ایجاد می‌شود [۱] میدان خارجی در جهت $+Z$ است.

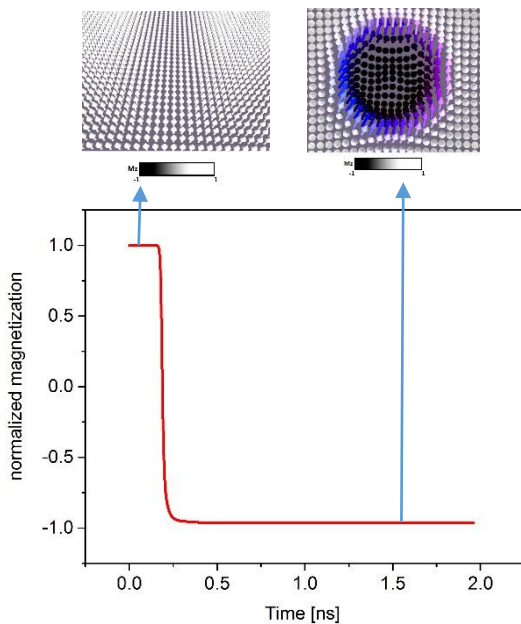


شکل (۱). تشکیل دراپلت مغناطیسی سالیتمونی در ساختار دریاچه اسپینی با ناهمسانگردی مغناطیسی عمود به صفحه

اشباع 716.2 kA/m ، ضریب تبدالی 30 pJ/m جریان پلاریزه شده که از لایه ثابت و در راستای عمود به لایه آزاد گشتاور وارد می کند تقارن گشتاور اسپینی ۱،۱ و برای راحتی کار ضریب پلاریزاسیون را یک گرفتیم . شبیه سازی ما در غیاب تغییرات دمایی در نظر گرفته شده است .

اندازه نمونه $1000 \times 1000 \times 5 \text{ nm}$ است . برای اینکه نیروی تبدالی را $\frac{d\hat{m}}{dt}$ در شبیه سازی بدون خطا در نظر گرفته باشیم باید اندازه سائز سلول های کمتر از فاصله موثر نیروی تبدالی $\lambda = 8.2 \text{ nm}$ بگیریم. به همین خاطر اندازه سلول را $5 \times 5 \times 5 \text{ nm}$ در نظر می-گیریم. اندازه قطر نانو اتصال را 50 nm در نظر می-گیریم. مدت زمان شبیه سازی در گام هایی با فاصله 0.2 ps تا 2 ns صورت گرفته است.

همانطور که در شکل (۳) قابل مشاهده است، مولفه عمود مغناطش (Mz) نانواتصال کاملا برعکس شده است که نشان دهنده تشکیل دراپلت مغناطیسی است.



شکل (۲). مغناطش نرمال شده نانو اتصال در جهت Z

همچنین شکل ۳ مولفه نوسانی مغناطش را نشان می-دهد که با انجام تبدیل فوریه (شکل ۴) فرکانس مغناطش داخل صفحه با فرکانس 13.18 GHz که کمتر از فرکانس تشدید فرومغناطیس لایه آزاد 22.5 GHz [9] است، نوسان می-کند . فرکانس به دست

باشد، دو قطبی فقط با فرکانس لارمور حول میدان خارجی نوسان می-کند و اگر اندازه جمله سوم بیشتر و مخالف جمله دوم باشد ، میرایی نه تنها از بین می-رود بلکه دو قطبی تمایل به چرخش حول مخالف میدان خارجی را پیدا می-کند . در اینجا مغناطش به خاطر ناهمسانگردی عمود به صفحه، تمایل بیشتری به معکوس شدن کامل نسبت به میدان خارجی دارد.

$$\gamma \hat{m} \times \mu_0 \vec{H}_{eff} + \alpha \hat{m} \times \frac{d\hat{m}}{dt} - \gamma \mu_0 M_s \sigma(I) f(\vec{x}) \epsilon \hat{m} \times \hat{m} \times \vec{M} \quad (1)$$

که در این معادله $\gamma/2\pi = 28 \text{ GHz/T}$ ضریب ژبرومغناطیسی ، \hat{M} و \hat{m} به ترتیب بردار های نرمالیزه مغناطش آزاد و ثابت هستند، α ضریب میرایی گیلبرت و یک ضریب بی بعد

ثابت \hbar در آن $\sigma(I) = \hbar I P \lambda / \mu_0 M_s^2 e V (\lambda + 1)$ کاهش یافته پلانک، I جریان پلاریزه شده، P پلاریزاسیون، $\lambda, v = (\lambda - 1) / (\lambda + 1)$ ، $\epsilon = 1 / (1 + v \hat{m} \cdot \vec{M})$

ضریب تقارنی گشتاور اسپینی، μ_0 ضریب نفوذ پذیری خلاء، M_s مغناطش اشباع ، e بار الکترون و V حجم لایه آزاد است.

شبیه سازی

سیستم مورد مطالعه در این پژوهش مطابق شکل ۱ ، یک دریچه اسپینی با ساختار کبالت/مس/کبالت-نیکل می-باشد که کبالت و کبالت-نیکل به ترتیب لایه ثابت و آزاد به دلیل تفاوت ویژگی های مغناطیسی هستند. شبیه سازی با نرم افزار متن باز MUMAX3 [8] در لایه آزاد صورت پذیرفت و مبنای محاسبات بر پایه روش Runge-Kutta انجام شد.

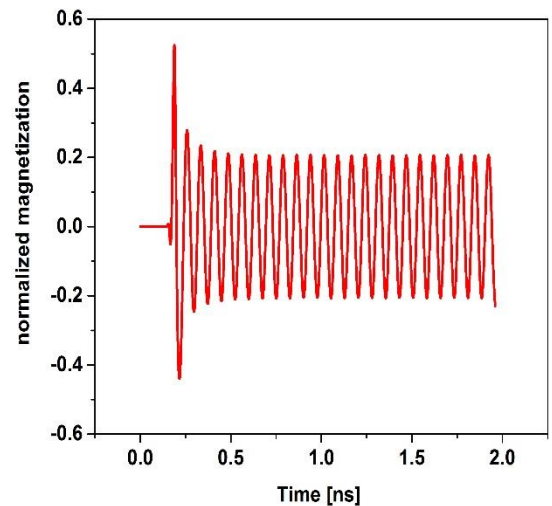
میدان مغناطیسی موثر \vec{H}_{eff} از میدان های تبدالی، دیامغناطشی، ناهمسانگردی و میدان خارجی عمود به صفحه $\mu_0 \vec{H}_a = 0.4 \text{ T}$ تشکیل شده است. میدان اورستدی که از جریان ناشی شده، را با تقریب یک استوانه بینهایت در نظر گرفته ایم. در اینجا خواص چندلایه های کبالت/ نیکل را در نظر گرفته ایم که عبارت است از [7]: ضخامت 5 nm ، ضریب میرایی گیلبرت: 0.05 ، ناهمسانگردی مغناطیسی عمود: 447 kJ/m^3 ، مغناطش

گیری در کاربردهای مخابراتی و الکترونیکی بر پایه امواج اسپینی است.

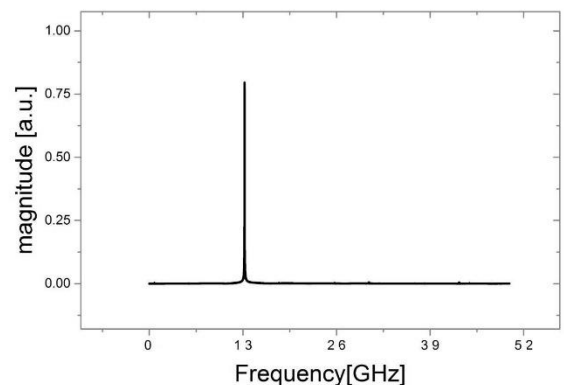
آمده تطابق خوبی با گزارشات منتشر شده به صورت تجربی و نظری دارد [5,7].

مرجع‌ها

- [۱] Vladislav E. Demidov, Sergei Urazhdin and Sergej O. Demokritov, *Nature Materials* 9, 984–988 (2010)
- [۲] Stefano Bonetti, Vasil Tiberkevich, Giancarlo Consolo, Giovanni Finocchio, Pranaba Muduli, Fred Mancoff, Andrei Slavin, and Johan Akerman, *PRL* 105, 217204 (2010)
- [۳] D. Backes, F. Macià, S. Bonetti, R. Kukreja, H. Ohldag, and A. D. Kent, *PRL* 115, 127205 (2015)
- [۴] Y. Zhou, E. Iacocca, A. A. Awad, R. K. Dumas, F. C. Zhang, H. B. Braun & J. Åkerman, *Nat. Commun.* 6,8193 (2015).
- [۵] M. A. Hofer, T. J. Silva, and Mark W. Keller, *PHYSICAL REVIEW B* 82, 054432 (2010)
- [۶] Randy K. Dumas, E. Iacocca, S. Bonetti, S. R. Sani, S. M. Mohseni, A. Eklund, J. Persson, O. Heinonen, and Johan Akerman, *PRL* 110, 257202 (2013)
- [۷] S. M. Mohseni, S. R. Sani, J. Persson, T. N. A. Nguyen, S. Chung, Y. Pogoryelov, P. K. Muduli, E. Iacocca, A. Eklund, R. K. Dumas, S. Bonetti, A. Deac, M. A. Hofer, and J. Åkerman, *Science* 339, 1295 (2013).
- [۸] A. Vansteenkiste and B. V. deWiele, *J. Magn. Magn. Mater.* 323, 2585 (2011).
- [۹] Ezio Iacocca, Randy K. Dumas, Lake Bookman, 2 Majid Mohseni Sunjae Chung, Mark A. Hofer, and Johan Åkerman *PRL* 112, 047201 (2014)



شکل (۳) مغناطش نرمال شده نانو اتصال در جهت X



شکل (۴) تبدیل فوری مولفه نوسانی مغناطش در شکل (۳)

ما در پژوهش توانستیم با استفاده از برنامه متن باز MUMAX دراپلت مغناطیسی سالیتمونی را شبیه سازی کرده و دینامیک ناشی از تشکیل آن را مورد مطالعه قرار دهیم. نتایج شبیه سازی موید معکوس شدن مولفه عمود مغناطش و دینامیک نوسانی مولفه های داخل صفحه مغناطش با فرکانسی کمتر از فرکانس تشدید فرومغناطیسی است که این نتایج تطابق خوبی با گزارشات نظری و تجربی منتشر شده دارد. نتایج این پژوهش قابل بهره