

05,13

Бистабильность магнитных скирмионов в многослойной структуре ферромагнетик/тяжелый металл

© В.А. Губанов¹, М. Mruczkiewicz², А.В. Садовников¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

² Institute of Electrical Engineering SAS, Dúbravská cesta 9,841 04, Bratislava, Slovak Republic

E-mail: vladmeen@gmail.com

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Методом микромагнитного моделирования исследовано влияние величины интерфейсного взаимодействия Дзялошинского–Мория на стабильность магнитных скирмионов в многослойной структуре ферромагнетик/тяжелый металл в зависимости от количества повторения мультислоев. Подобраны параметры многослойной структуры для стабилизации магнитных скирмионов в наностолбиках, образованных слоями Ir/Co/Pt. Показано, как величина обменного взаимодействия Дзялошинского–Мория влияет на тип, стабильность и радиус магнитных скирмионов в многослойном наностолбике. Полученные результаты могут быть использованы для создания устройств обработки и хранения информационных сигналов.

Ключевые слова: спиновые волны, магноника, магнитные скирмионы, ферромагнетик, тяжелый металл, взаимодействие Дзялошинского–Мория, мультистабильность.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52820.19NN

1. Введение

Исследования стабилизации магнитных вихрей представляет в последнее время большой интерес ввиду рассмотрения способов формирования наноразмерных цилиндров в том числе с криволинейным профилем поперечного сечения [1]. В настоящее время в области магнитных материалов активно исследуются магнитные вихри, называемые скирмионами. Ввиду малого размера и сохранения топологической устойчивости при взаимодействии с другими устойчивыми состояниями намагниченности скирмион может использоваться в устройствах памяти с высокой плотностью записи [2].

Скирмионы могут стабилизироваться в нанометровых пленках за счет внешнего магнитного поля, перпендикулярной анизотропии и интерфейсного взаимодействия Дзялошинского–Мория (interfacial Dzyaloshinskii–Moriya Interaction, в дальнейшем по тексту — DMI), которое возникает на границе ферромагнетик/тяжелый металл. [3,4]. В случае многослойных структур существует дополнительный вклад от дипольного взаимодействия [5,6]. Было обнаружено, что при уменьшении геометрических размеров слоев возможно увеличение стабильности скирмиона [7]. Также было экспериментально показано, что созданные магнитные скирмионы могут быть стабильны при комнатной температуре [8,9]. Зарождение скирмионных структур возможно при помощи наконечника магнитно-силовой микроскопии, при котором наводится магнитное возмущение в структуре [10,11]. К примеру, это было представлено для структуры Pt/Co/Pt [12–14].

В настоящей работе представлены результаты микромагнитного моделирования многослойных структур с повторяющимися слоями ферромагнетика/тяжелого металла. Показан эффект мультистабильности магнитных скирмионов при изменении величины обменного взаимодействия. Отдельно исследовано как величина взаимодействия Дзялошинского–Мория влияет на трансформацию типа скирмиона в исследуемой структуре.

2. Исследуемые структуры и методика численного моделирования

На рис. 1 показано схематическое изображение многослойной структуры ферромагнетик/тяжелый металл. В структуре чередуются три слоя: Ir/Co/Pt. В дальнейшем было проведено усреднение материальных параметров и проведена замена трех слоев на один мультислой ферромагнетика, т.к. скирмион возникает в ферромагнитном слое.

Диаметр наностолбика D_d составлял 200 nm, толщина структуры зависела от количества повторений n . Для реальной структуры толщина мультислоя составляла 2.4 nm (Ir = 0.9 nm, Co = 0.6 nm, Pt = 0.9 nm), а в программе микромагнитного моделирования составляла 0.6 nm (использовалась только толщина ферромагнетика).

Микромагнитное моделирование проводилось в программном пакете MuMax3 [15], в котором решается уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта [16]: Количество повторений варьировалось от 2 до 4. Ве-

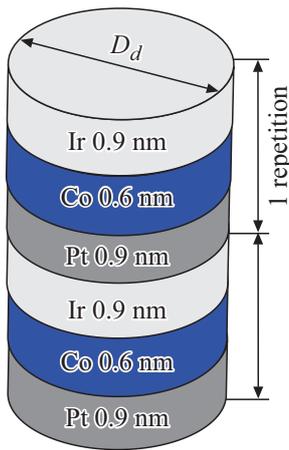


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры.

личина взаимодействия DMI изменялась в диапазоне 0–1.2 мДж/м², что согласуется с экспериментальными данными [6,17–21].

Зарождаемые скирмионы обладают такой характеристикой, как диаметр скирмиона D_{sk} . Данная величина зависит как от величины DMI, так и количества мультислоев. D_{sk} измерялся следующим образом: брался диаметральный срез и находилось положение спина с ориентацией 0 (лежащий в плоскости пленки). Таких положений в срезе будет два в случае стабилизированного скирмиона. Также необходимо отметить, что зарождаемые скирмионы могут быть разных типов — неелевские и блоховские [22].

При проведении микромагнитного моделирования были найдено, что в магнитных наностолбиках могут зарождаться скирмионы одного типа, но с разным направлением ориентации спина — так называемого направления по часовой стрелке и против часовой стрелки (в дальнейшем будут обозначаться как R и L для неелевского типа скирмиона, B и C — для блоховского скирмиона).

На рис. 2 показаны зависимости соотношения диаметра скирмиона к диаметру наностолбика D_{sk}/D_d от величины DMI для структуры с 6 повторениями. Для получения данной зависимости проводились следующие шаги. Начальная величина DMI полагалась 0.03 мДж/м² (необходимо небольшое отклонение в данном взаимодействии), зарождался скирмион, происходила релаксация системы, и измерялся диаметр скирмиона. Полученное распределение намагниченности использовалось как исходное состояние для дальнейшего увеличения величины DMI с небольшим шагом (0.003 мДж/м²) до величины 1.2 мДж/м². Также на каждом шагу проводилось определение типа скирмиона (R, L, B или C). Как видно на рис. 2, в данной структуре наблюдается трансформация типа скирмиона в 4 мультислое с типа R в L через промежуточный скирмион типа C и для каждого существующего скирмиона выделены три

области (L — I, C — II, R — III). Это может говорить о том, что при конкретной величине DMI мы можем наблюдать данную конфигурацию скирмионов, которые в дальнейшем могут быть использованы как комбинация для кодирования данных.

Однако помимо явления изменения типа скирмиона при изменении величины DMI также был показан мультистабильный характер многослойной структуры. Для демонстрации данного эффекта проведено микромагнитное моделирование для структуры с повторением мультислоев $n = 2$ и $n = 4$. Для выявления мультистабильного состояния помимо поэтапного увеличения величины DMI (на рис. 3 и 4 показано красным цветом), при достижении 1.2 мДж/м² происходило поэтапное уменьшение величины DMI (на рис. 3 и 4 показано синим цветом). Для случая $n = 2$ наблюдается область мультистабильности в диапазоне 0.34–0.55 мДж/м². Как видно на вставке к рис. 3, а, при увеличении величины DMI происходит трансформация скирмиона во втором слое с R-типа в L-тип с промежуточным значением C, а при уменьшении величины DMI — с L-типа в R-тип через B. При этом при прямом и обратном изменении величины в области мультистабильности DMI наблюдаются разные соотношения D_{sk}/D_d .

При количестве повторений мультислоев $n = 4$ наблюдалось смещение области мультистабильности в более высокую область величин взаимодействия DMI (от 0.8 мДж/м² до 1.2 мДж/м²), а также при величине DMI 0.4 мДж/м² происходит изменение наклона кривой. Если рассматривать на изменение типа скирмиона в мультислое, то при величине DMI 0.4 мДж/м² происходит изменение типа скирмиона с R на L при увеличении DMI и с L на R при уменьшении DMI в 3 мультислое. Данный процесс происходит без мультистабильного состояния.

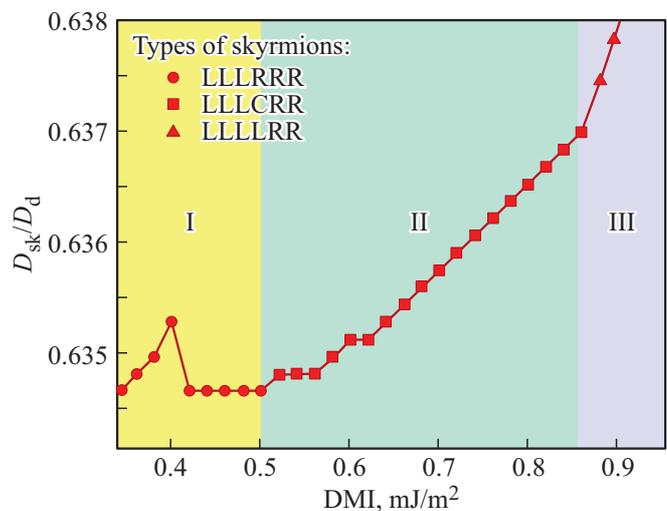


Рис. 2. График зависимости соотношения D_{sk}/D_d от величины взаимодействия DMI. Области с разными типами скирмионов в третьем слое: I — LLRR, II — LLCR, III — LLLR.

Так как речь идет о скирмионах как о стабильных конфигурациях намагниченности, то было проведено микромагнитное моделирование, в котором были получены зависимости общей энергии системы E_{total} от величины DMI. На рис. 3, *b* и 4, *b* показаны зависимости общей энергии системы для количества повторения слоев $n = 2$ и $n = 4$.

На данных графиках представлены значения E_{total} с отрицательными значениями. Это можно расценивать как отклонение от равновесного состояния ($E_{total} = 0$ J). А изменение энергии указывает на образование скирмионных структур. При сравнении полученных графиков необходимо обратить внимание на величины E_{total} в случае $n = 2$ и $n = 4$. Для $n = 2$ E_{total} изменяется в диапазоне $(-0.4) \div (-1.6) \cdot 10^{-18}$ J, а для $n = 4$ — в диапазоне $(-2.75) \div (-4.5) \cdot 10^{-18}$ J. При сравнении данных величин можно понять, что при увеличении слоев энергия системы увеличивается.

Также на рис. 3 и 4 отмечены серой пунктирной линией величины DMI, в которых происходит транс-

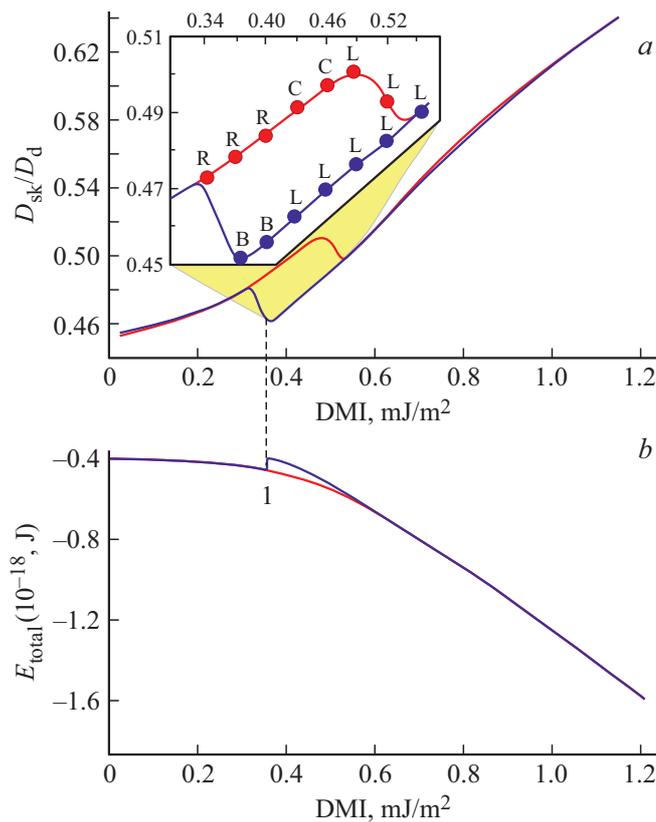


Рис. 3. *a*) График зависимости соотношения D_{sk}/D_d от величины взаимодействия DMI в структуре с количеством слоев $n = 2$. Красным цветом (верхняя часть) показана зависимость, построенная при увеличении величины взаимодействия DMI, синим цветом (нижняя часть) — при уменьшении величины DMI. На вставке: режим мультистабильности — изменение типа скирмиона во втором мультислое при увеличении и уменьшении DMI. *b*) Зависимость общей энергии системы E_{total} от величины DMI. Цифрой 1 обозначен момент переключения.

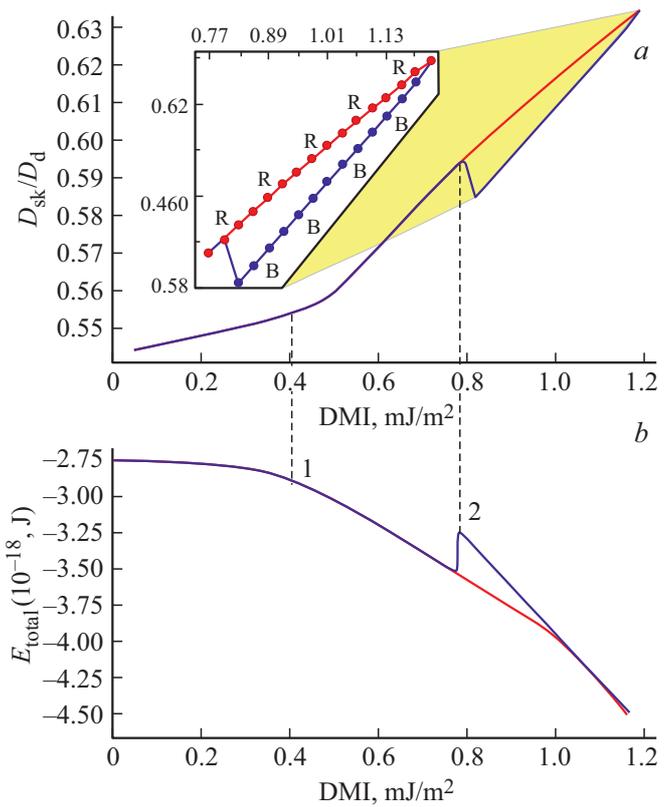


Рис. 4. *a*) График зависимости соотношения D_{sk}/D_d от величины взаимодействия DMI в структуре с количеством слоев $n = 4$. Красным цветом (верхняя часть) показана зависимость, построенная при увеличении величины взаимодействия DMI, синим цветом (нижняя часть) — при уменьшении величины DMI. На вставке: режим мультистабильности — изменение типа скирмиона в третьем мультислое при увеличении и уменьшении DMI. *b*) Зависимость общей энергии системы E_{total} от величины DMI. Цифрами 1 и 2 обозначен момент переключения (1 — переключения без эффекта бистабильности, 2 — с бистабильностью).

формация типа скирмиона и показывающая связь между изменением D_{sk} и E_{total} . Так для $n = 2$ есть 1 значение DMI, а для $n = 4$ — 2 значения DMI.

Как описывалось ранее, в некоторых случаях смена типа скирмиона может происходить с эффектом бистабильности, при котором также наблюдается бистабильное изменение энергии системы.

Видно, что как и в случае зависимостей D_{sk}/D_d от величины DMI, наблюдается 3 области: 1 область от 0 до 0.4 mJ/m^2 как для прямого, так и для обратного прохода величина общей энергии системы остается одинаковой и при критическом значении 0.5 mJ/m^2 , как видно на рис. 4, *a*, происходит трансформация типа скирмиона в 3 слое. При этой трансформации происходит изменение общей энергии системы в виде изменения наклона кривой (в диапазоне от 0.5 до 1.2 mJ/m^2). Начиная от 0.8 mJ/m^2 наблюдается область мультистабильности,

при которой видно двунаправленное изменение радиуса скирмиона, а также общей энергии системы.

Таким образом за мультистабильностью можно наблюдать при помощи изменения общей энергии системы. При этом мультистабильные режимы образования скирмионов различного типа в слоях многослойной структуре могут наблюдаться при реально достигаемых в экспериментальных образцах значениях постоянной интерфейсного взаимодействия Дзялошинского–Мория, что может привести к скорому обнаружению выявленного эффекта в экспериментальном исследовании. При этом использование многослойных нанодисков позволяет наблюдать методами атомно-силовой микроскопии процессы формирования и стабилизации скирмионов [23].

3. Заключение

Таким образом, с помощью численного моделирования исследовано влияние величины взаимодействия Дзялошинского–Мория на стабильность магнитных скирмионов в многослойной структуре ферромагнетик/тяжелый металл в зависимости от количества повторения мультислоев. Подобраны параметры многослойной структуры для стабилизации магнитных скирмионов в многослойной структуре Ir/Co/Pt. Показано как при изменении величины DMI с последующей трансформацией типа скирмиона изменяются D_{sk}/D_d и E_{total} . Показаны режимы мультистабильности в многослойной структуре Ir/Co/Pt. Полученные результаты могут быть использованы для создания устройств обработки и хранения информационных сигналов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Bublikov, J. Tóbiik, A.V. Sadovnikov, M. Mruczkiewicz. *J. Magn. Magn. Mater.* **537**, 168105 (2021).
- [2] K. Everschor-Sitte, J. Masell, R.M. Reeve, M. Kläui. *J. Appl. Phys.* **124**, 240901 (2018).
- [3] N. Romming, C. Hanneken, M. Menzel, J.E. Bickel, B. Wolter, K. von Bergmann, A. Kubetzka, R. Wiesendanger. *Science* **341**, 636 (2013).
- [4] H. Yang, A. Thiaville, S. Rohart, A. Fert, M. Chshiev. *Phys. Rev. Lett.* **115**, 26, 267210 (2015).
- [5] F. Büttner, I. Limesh, G.S.D. Beach. *Sci. Rep.* **8**, 1 (2018).
- [6] M. Zelent, J. Tóbiik, M. Krawczyk, K.Y. Guslienko, M. Mruczkiewicz. *Phys. Status Solidi (RRL) Rapid Res. Lett.* **11**, 1700259 (2017).
- [7] S. Rohart, A. Thiaville. *Phys. Rev. B* **88**, 184422 (2013).
- [8] K. Zeissler, M. Mruczkiewicz, S. Finizio, J. Raabe, P. Shepley, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, K. Fallon, S. McFadzean, S. Mcvitie, T.A. Moore, G. Burnell, C.H. Marrows. *Sci. Rep.* **7**, 15125 (2017).
- [9] V. Karakas, A. Gokce, A.T. Habiboglu, S. Arpacı, K. Ozbozduvan, I. Cinar, C. Yanik, R. Tomasello, S. Tacchi, G. Siracusano. *Sci. Rep.* **8**, 7180 (2018).
- [10] A. Casiraghi, H. Corte-León, M. Vafaei, F. Garcia-Sanchez, G. Durin, M. Pasquale, G. Jakob, M. Kläui, O. Kazakova. *Commun. Phys.* **2**, 1 (2019).
- [11] А.И. Безверхний, В.А. Губанов, А.В. Садовников, Р.Б. Моргунов. *ФТТ* **63**, 12.2053 (2021)
- [12] V.L. Mironov, R.V. Gorev, O.L. Ermolaeva, N.S. Gusev, Y. Petrov. *Phys. Solid State* **61**, 1594 (2019).
- [13] M.V. Sapozhnikov, R.V. Gorev, E.V. Skorokhodov, N.S. Gusev, A.V. Sadovnikov, O.G. Udalov. *Phys. Rev. B* **105**, 024405 (2022).
- [14] N.S. Gusev, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, M.V. Sapozhnikov, O.G. Udalov. *Phys. Rev. Lett.* **124**, 157202 (2020).
- [15] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge. *AIP Advances* **4**, 107133 (2014).
- [16] L. Landau, E. Lifshitz. *Phys. Z. Sow.* **8**, 153 (1935).
- [17] K. Gerlinger, B. Pfau, F. Büttner, M. Schneider, L.-M. Kern, J. Fuchs, D. Engel, C.M. Günther, M. Huang, I. Limesh, L. Caretta, A. Churikova, P. Helsing, C. Klose, C. Strüber, C. von Korff Schmising, S. Huang, A. Wittmann, K. Litzius, D. Metternich, R. Battistelli, K. Bagschik, A. Sadovnikov, G.S.D. Beach, S. Eisebitt. *Appl. Phys. Lett.* **118**, 192403 (2021).
- [18] A.V. Ognev, A.G. Kolesnikov, Yong Jin Kim, In Ho Cha, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, I.V. Soldatov, A. Talapatra, J. Mohanty, M. Mruczkiewicz, Y. Ge, N. Kerber, F. Dittrich, P. Virnau, M. Kläui, Young Keun Kim, A.S. Samardak. *ACS Nano* **14**, 11, 14960 (2020).
- [19] A.S. Samardak, A.V. Davydenko, A.G. Kolesnikov, A.Yu. Samardak, A.G. Kozlov, Bappaditya Pal, A.V. Ognev, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, A.V. Gerasimenko, In Ho Cha, Yong Jin Kim, Gyu Won Kim, O.A. Tretiakov, Young Keun Kim. *NPG Asia Mater.* **12**, 51 (2020).
- [20] S. Finizio, S. Wintz, K. Zeissler, A.V. Sadovnikov, S. Mayr, S.A. Nikitov, C.H. Marrows, J. Raabe. *Nano Lett.* **19**, 1, 375 (2019).
- [21] И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.А. Дудин, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, М.П. Темиряева, А.Г. Темиряев, С.А. Никитов. *ФТТ* **61**, 9, 1694 (2019).
- [22] W. Kang, Y. Huang, X. Zhang, Y. Zhou, W. Zhao. *Proc. IEEE* **104**, 10, 2040 (2016).
- [23] Iu.V. Vetrova, M. Zelent, J. Šoltýs, V.A. Gubanov, A.V. Sadovnikov, T. Šcepka, J. Dérer, R. Stoklas, V. Cambel, M. Mruczkiewicz. *Appl. Phys. Lett.* **118**, 212409 (2021).

Редактор Т.Н. Василевская