

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Исследование магнитных скирмионов
в наноструктурах Ir / Co / Pt**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 431 группы
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»
ФАКУЛЬТЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
Асташина Олега Сергеевича

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А. В. Садовников
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.А. Короновский
инициалы, фамилия

Саратов 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

Скирмион – это процесс переворота намагниченности. Скирмион устроен следующим образом. Можем себе представить двумерную структуру в каждой точке которой существует вектор намагниченности, этот вектор в центре скирмиона, как показано на рисунке в центре, направлен вниз, а по бокам в вверх и этот вектор может различным путем осуществлять переворот намагниченности на 180 градусов, путь переворачивания скирмиона и будет определять хиральность, то есть зависимость от направления, так как нарушается симметрия. В неэлевском скирмионе намагниченность вращается в плоскости по радиусу. А блоховском скирмионе намагниченность перпендикулярно радиусу, удаляясь от центра скирмиона.

Актуальность выбранной работы обусловлена рассматриваемой магнитной структурой, то есть скирмионом. Они могут быть использованы в качестве единиц хранения информации в устройствах обработки информационного сигнала.

В обычных жестких дисках для хранения данных используется разное направление намагниченности небольших областей. Минимальный физический размер такой области, определяющийся емкостью памяти, уже достиг 100 нанометров, но если уменьшать их дальше, магнитные домены станут неустойчивыми, начнут размагничиваться и терять информацию. А так как Скирмион - более стабильные структура, размер которых может составлять всего несколько нанометров, на их основе можно будет создать устройства хранения данных со значительно более высокой плотностью. «Скирмионная» память, кроме того, будет быстрой, надежной, дешевой, экономичной и энергонезависимой, то есть сохраняющей информацию даже при выключении питания.

Наиболее заметное применение скирмионов в области хранения данных — это Racetrack (беговая дорожка), которая работает по аналогии с

технологией перфорированной ленты. В конкретном случае данные хранятся на волноведущей структуре в виде закодированных областей, чередующимися друг за другом, подобно бусам в счетах. В такой системе данные записываются в двоичной системе счисления (1-в ячейке памяти есть данные, 0-пустая ячейка памяти). В той области, в которой наблюдается скирмион, задается ячейка 1, там, где скирмиона нет задается ячейка 0. Из такой последовательности можно составлять массивы данных, в которые будут устойчивы к внешним возмущениям.

Цель работы. Провести численное исследование магнитных скирмионов в многослойной структуре, представляющей собой наностолбики из платины, кобальта, иридия, показать, как боковое ограничение и соответствующая магнитостатическая энергия приводят к стабилизации скирмионов большого радиуса, если сила DMI слабая, показать, что из-за бокового ограничения и сильных магнитостатических взаимодействий скирмионы могут быть бистабильны в многослойных круглых структурах, даже при нулевом магнитном поле.

Из материальных свойств этой структуры мы получаем асимметрию граничных условий на этих интерфейсах. DMI – обмен, который определяет частоты колебаний намагниченности в ферромагнитном слое, который граничит с тяжёлым металлом.

Работа выполнена состоит из введения, шести глав и заключения. Список литературных источников содержит 23 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для численного моделирования использовался программный пакет Muthax³, со средой численного моделирования MatLab. Решалось уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, отметим что уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, как вы видите записано в производной, которая берется от времени, но поскольку у нас параметр эффективного магнитного поля имеется в этом уравнении отметим, что в это параметр входит зависимость пространственной координаты (радиус r), таким образом задача решается, в пространстве и во времени в трехмерной геометрии, так как исследуемая структура многослойна

$$\frac{\delta M}{\delta t} = |\gamma| [H_{eff} * M] \frac{\alpha}{M_0} [M * \frac{\delta M}{\delta t}],$$

где M — вектор намагниченности — магнитный момент элементарного объёма, используемый для описания магнитного состояния вещества, $\alpha = 0,3$ — параметр затухания, $\gamma = 2,8$ МГц/Э — Гиромагнитное отношение в кобальте (магнитомеханическое отношение) — отношение дипольного магнитного момента электрона к её механическому моменту, H_{eff} — эффективное магнитное поле, рассчитывается по формуле:

$$H_{eff} = H_0(r) + h_d(r, t) + h_{ex}(r, t),$$

где H_0 — внешнее поле, h_d — дипольное взаимодействие, h_{ex} — обменное взаимодействие (DMI) — взаимодействие, возникающее между слоями ферромагнетика и тяжелого металла.

При численном моделировании уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта в многослойной структуре, можно пронаблюдать неелевский и блоховский скирмион, в том числе, внутри каждого из них можно выделить две группы: R и L для неелевского, B и C для блоховского. Разница в них состоит в том, что они отличаются направлениями намагниченности. Один тип неелевского

скирмиона имел намагниченность направленную во внутрь центра слоя, а на другом наоборот, 12 из него; так же и с блоховским, один тип на одном слое имеет намагниченность направленную по часовой стрелке, а на другом против.

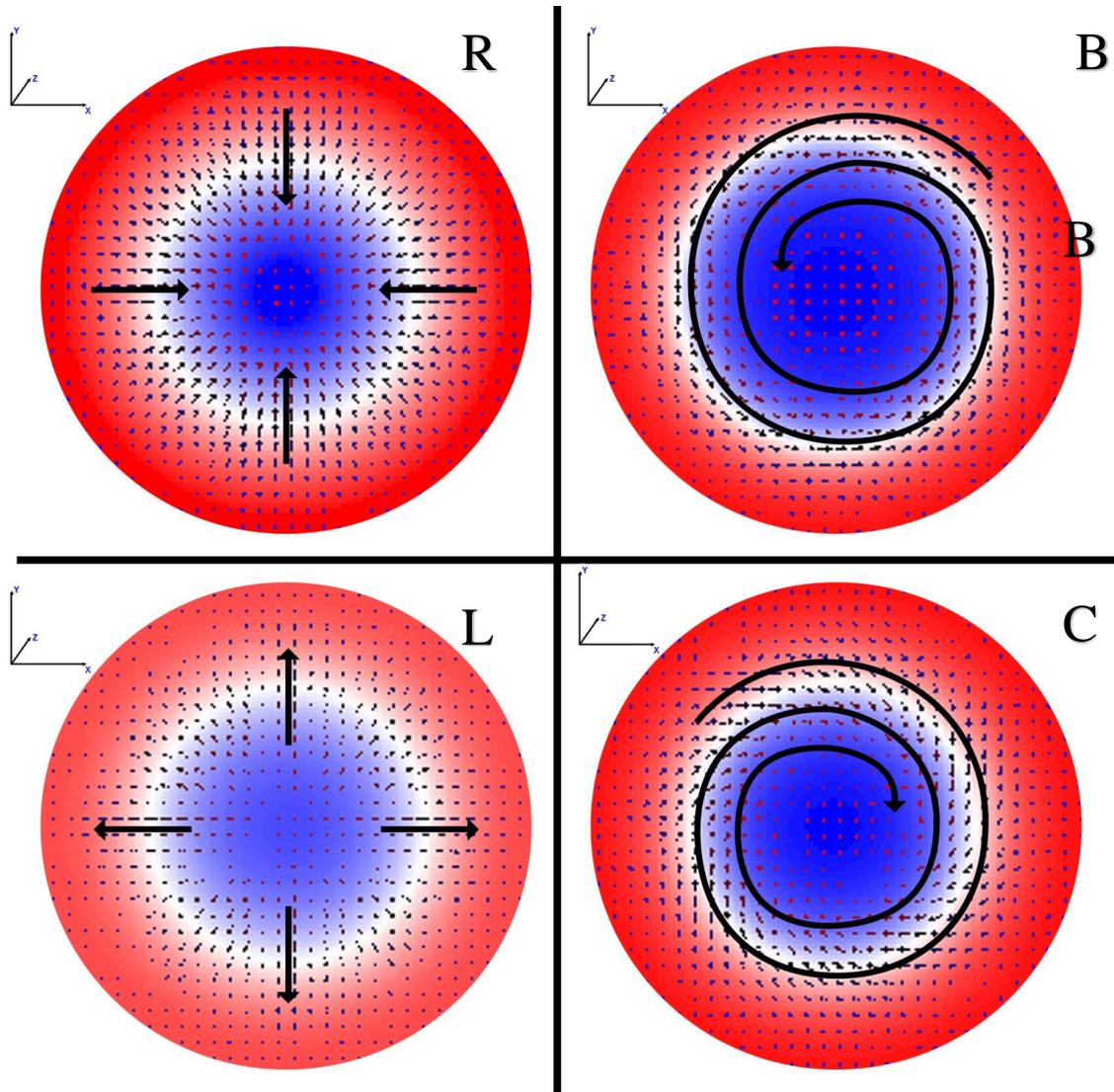


Рис 1: Наблюдаемые скирмионы в слоях: Неелевский (R и L) и Блоховский (B и C)

Структура, использованная в работе, представляет собой наностолбик, диаметр которого 250 нм. Толщины слоёв: Ir — 0.9 нм, Co — 0.6 нм., Pt — 0.9 нм. Причем иридий и платина — это немагнитные материалы, которые обеспечивают асимметричное обменное взаимодействие. И только кобальт магнитный материал (ферромагнетик). Иридий и платина нужны только для

обеспечения прослойки между магнитными материалами, для обменного взаимодействия Дзялошинского-Мория (DMI).

Рассмотрим результаты моделирования. На рисунке 2 верхнем графике представлена зависимость радиуса скирмиона отнесенного к радиусу диска, как функция параметра обмена Дзялошинского Мория. Производился расчет стабильной скирмионной структуры, при изменении параметра DMI, в случае увеличения параметра DMI, и это соответственно синяя кривая, так и в случае уменьшения параметра DMI, то есть красная кривая. При увеличении DMI, наблюдается сначала плавное смещение радиуса скирмиона, причем тип скирмиона в слоях LR из терминологии указанной на предыдущем слайде. Далее видим скачек, в области DMI 0.6, и опять продолжает увеличиваться радиуса скирмиона и меняется тип скирмиона в слоях. При рассмотрении ситуации, когда параметр DMI уменьшается мы видим плавное начало уменьшение радиуса скирмиона с сохранением его типа, затем тип скирмиона меняется, но явно в области параметров от 0,3 до 0,6, присутствует явление бистабильности, то есть при обратном изменении радиуса скирмиона кривая не повторяет ее ход, как он наблюдался при предыдущем случае. Так же была построена зависимость общей энергии системы определяемой по формуле $E_{tot} = - \frac{1}{2} \int dv \mathbf{M} * \mathbf{V}_{eff} v$, как функция от параметра DMI. Видно, что в области бистабильности, энергия у каждого типов скирмионов разная, что подтверждает, что в данном регионе имеет место разная конфигурация намагниченности, как пространственная, так и энергетическая.

На следующем этапе был проведен расчет для 3-х слойной структуры (рисунок 3), из того же самого материала, и видно, что область существования 2-х типов скирмионных состояний при одинаковом значении DMI, область бистабильности она смещается в сторону большего значения DMI от 0,6 до 0,9.

И при увеличении количества слоев структуры до 4-х (рисунок 4). И уже в четырех слойной структуре видно, что область параметров DMI смещается еще больше вправо.

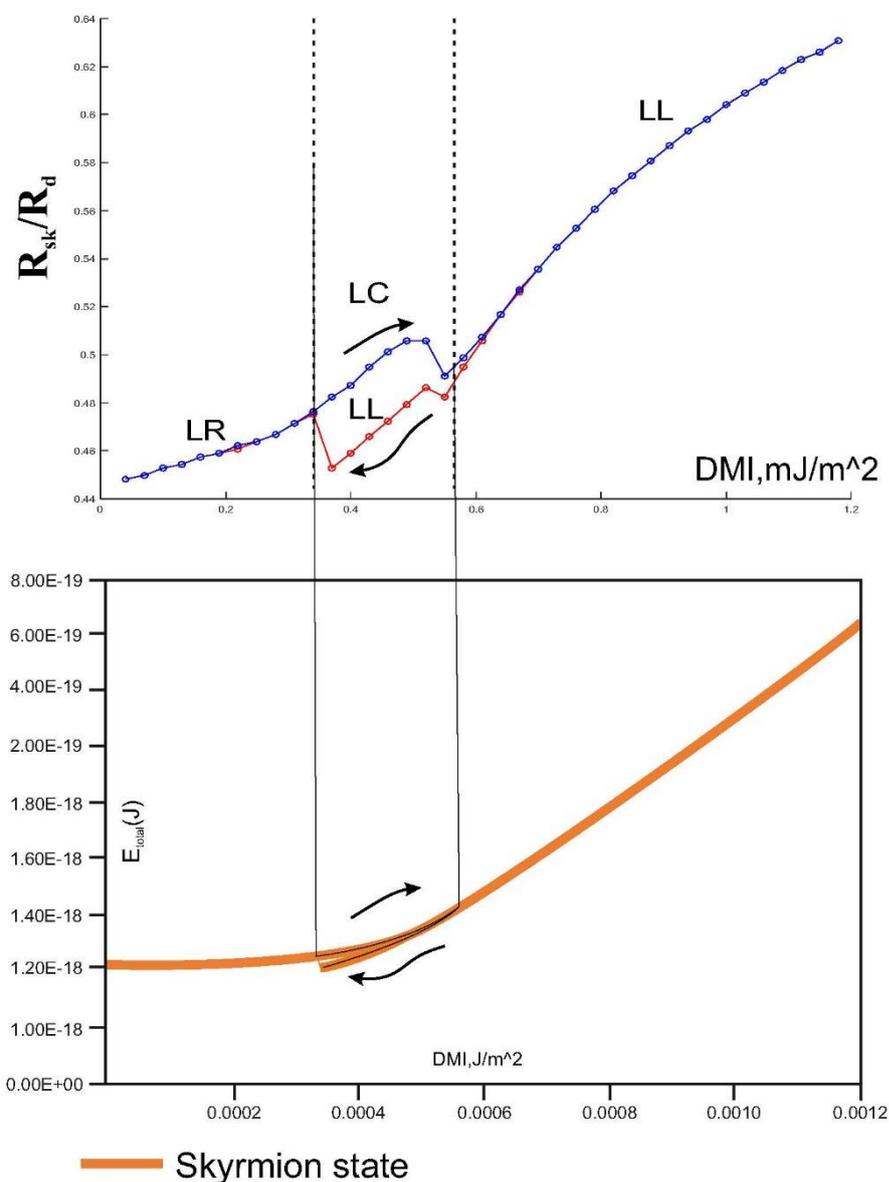


Рис 2: а) График зависимости радиуса скирмиона от DMI в 2-х слойной структуре. б) График зависимости общей энергии системы от DMI. Синяя кривая - начальное $DMI = 0,05$ и DMI увеличиваем. Красная кривая - начальное $DMI = 0,9$ и DMI уменьшаем.

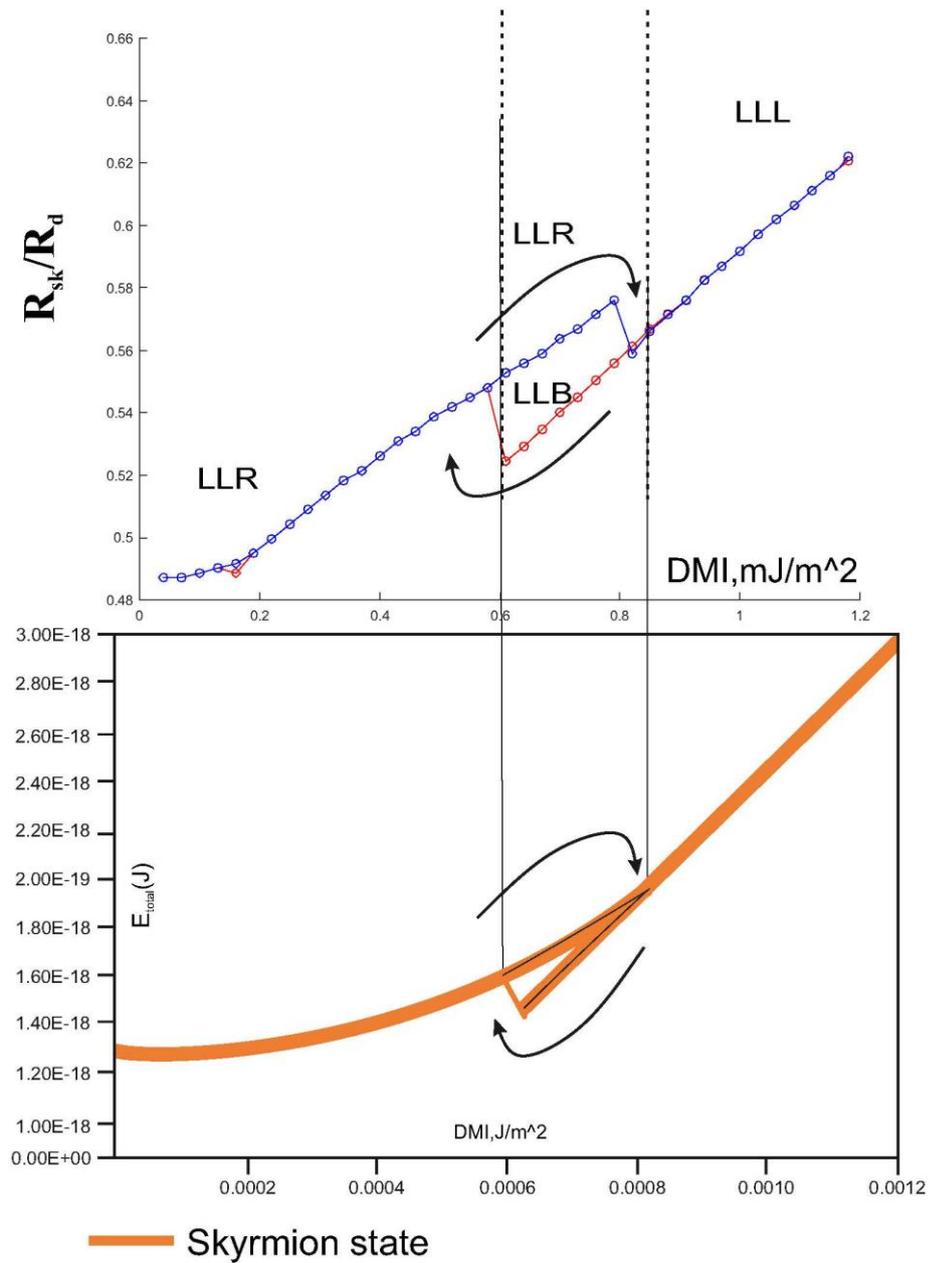


Рис 3: а) График зависимости радиуса скирмиона от DMI в 3-х слойной структуре. б) График зависимости общей энергии системы от DMI. Синяя кривая - начальное $DMI = 0,05$ и DMI увеличиваем. Красная кривая - начальное $DMI = 0,9$ и DMI уменьшаем.

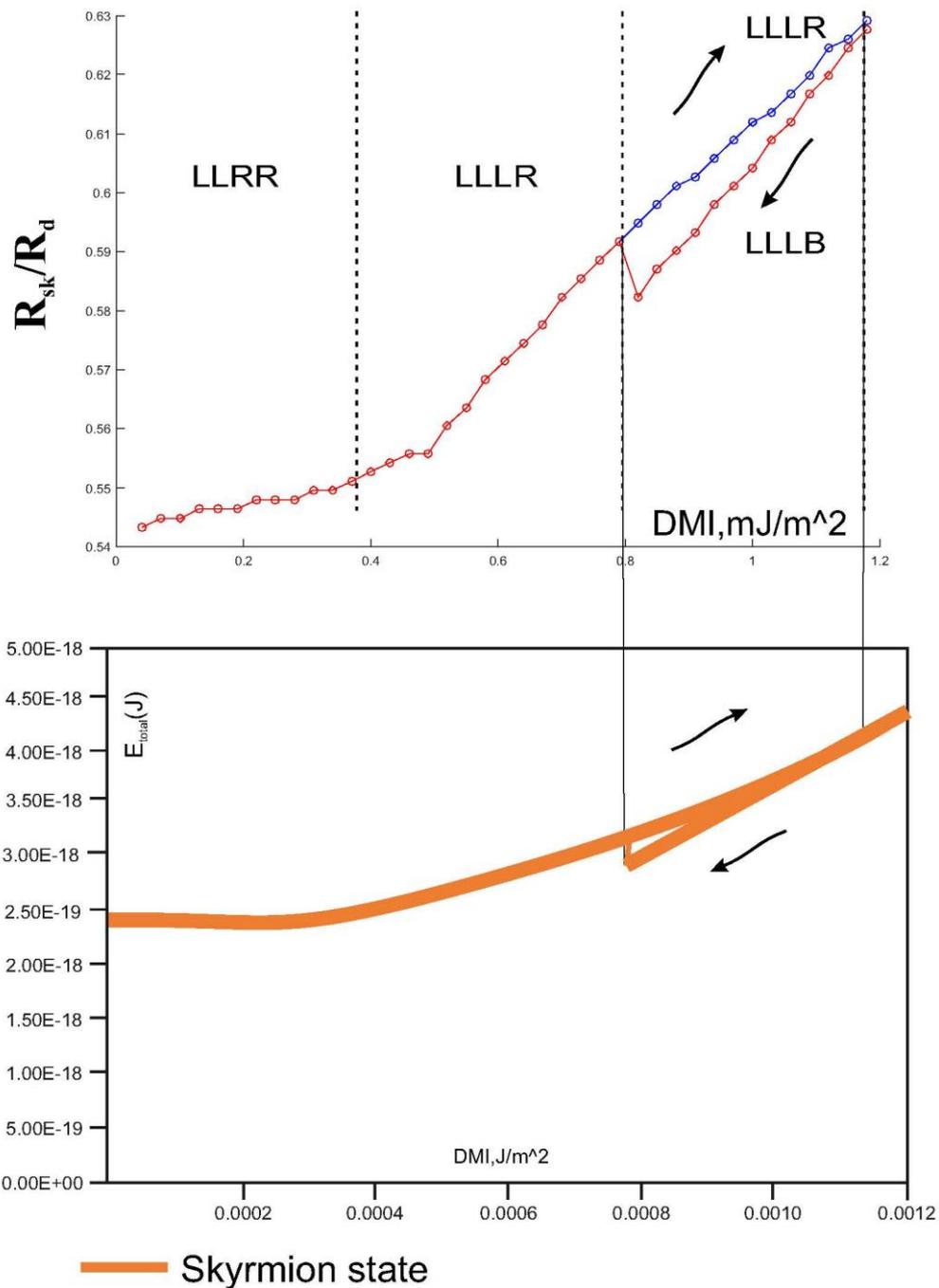


Рис 4: а) График зависимости радиуса скирмиона от DMI в 4-х слойной структуре. б) График зависимости общей энергии системы от DMI. Синяя кривая - начальное $DMI = 0,05$ и DMI увеличиваем. Красная кривая - начальное $DMI = 0,9$ и DMI уменьшаем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировано влияние магнитостатического взаимодействия в круговых многослойных структурах на устойчивость конфигурации намагниченности скирмиона в слоях ферромагнетика. Я выявил зависимость мультистабильного положения от количества слоев в структуре. В этой работе, использовались структуры с количеством слоев не превышающих 4 слоев. Было доказано, что скирмионы могут быть стабилизированы за счет DMI. Также было замечено, что эти два вида скирмиона могут быть стабильным одновременно в том же наностолбце.

Таким образом, я в своей работе продемонстрировал бистабильность конфигурации скирмионов с одинаковыми полярностями ядра. Бистабильные скирмионы может быть получены в точках с реалистичными значениями размеров точек и параметрами прочности, обмена и анизотропии DMI. Подход моделирования на основе встроенной функции Mumax “frozen spins” даёт возможность оценить минимальные пути энергии между двумя Неэль скирмионы с разными радиусами.

Изменение количества слоев можно достигать таких областей с заданным DMI, где состояние системы стабильно и еще нет бистабильности. Это необходимо для использования в системах памяти, поскольку нужно понимать, где стабильное состояние системы, а где бистабильное состояние системы, чтобы не потерять закодированный бит информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] I. Dzyaloshinsky, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **4**, 241 (1958).
- [2] T. Moriya, *Physical Review* **120**, 91 (1960).
- [3] A. Fert and P. M. Levy, *Phys. Rev. Lett.* **44**, 1538 (1980).
- [4] A. Crépieux and C. Lacroix, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **182**, 341
- [5] C. Moreau-Luchaire, C. Moutafis, N. Reyren, J. Sampaio, C. A. F. Vaz, N. Van Horne, K. Bouzehouane, K. Garcia, C. Deranlot, P. Warnicke, P. Wohlhüter, J.-M. George, M. Weigand, J. Raabe, V. Cros, and A. Fert, *Nature Nanotechnology* **11**, 444 (2016).
- [6] S. D. Pollard, J. A. Garlow, J. Yu, Z. Wang, Y. Zhu, and H. Yang, *Nature Communications* **8**, 14761 (2017).
- [7] O. Boulle, J. Vogel, H. Yang, S. Pizzini, D. d. S. Chaves, A. Locatelli, T. O. M. A. Sala, L. D. BudaPrejbeanu, O. Klein, M. Belmeguenai, Y. Roussigné, A. Stashkevich, S. M. Chérif, L. Aballe, M. Foerster, M. Chshiev, S. Auffret, I. M. Miron, and G. Gaudin, *Nature Nanotechnology* **11**, 449 (2016).
- [8] F. Büttner, I. Lemesh, and G. S. D. Beach, *arXiv* , 1704.08489 (2017).
- [9] M. Mruczkiewicz, M. Krawczyk, and K. Y. Guslienko, *Physical Review B* **95**, 094414 (2017).
- [10] S. Rohart and A. Thiaville, *Physical Review B* **88**, 184422 (2013).
- [11] C. Moutafis, S. Komineas, C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, T. Shima, T. Seki, and K. Takanashi, *Physical Review B* **76**, 104426 (2007).
- [12] K. Y. Guslienko, *IEEE Magnetics Letters* **6**, 4000104 (2015).
- [13] K. Zeissler, M. Mruczkiewicz, S. Finizio, J. Raabe, P. M. Shepley, A. V. Sadovnikov, S. A. Nikitov, K. Fallon, S. McFadzean, S. McVitie, T. A. Moore, G. Burnell, and C. H. Marrows, *arXiv* , 1706.01065 (2017).
- [14] R. Tomasello, E. Martinez, R. Zivieri, L. Torres, M. Carpentieri, and G. Finocchio, *Scientific reports* **4**, 6784 (2014).
- [15] X. Yu, N. Kanazawa, W. Zhang, T. Nagai, T. Hara, K. Kimoto, Y. Matsui, Y. Onose, and Y. Tokura, *Nature Communications* **3**, 988 (2012).
- [16] M. Beg, R. Carey, W. Wang, D. Cortés-Ortuño, M. Vousden, M.-A. Bisotti, M. Albert, D. Chernyshenko, O. Hovorka, R. L. Stamps, and H. Fangohr, *Scientific Reports* **5**, 17137 (2015).
- [17] K. Y. Guslienko, *IEEE Magnetics Letters* **6**, 4000104 (2015)
- [18] Everschor-Sitte, K., Masell, J., Reeve, R. M., & Kläui, M. (2018). *Perspective: Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field. Journal of Applied Physics*, 124(24), 240901. doi:10.1063/1.5048972

- [19] Katharina Zeissler, Simone Finizio, Craig Barton, Alexandra J. Huxtable, Jamie Massey, Jörg Raabe, Alexandr V. Sadovnikov, Sergey A. Nikitov (2020). *Diameter-independent skyrmion Hall angle observed in chiral magnetic multilayers*, *Nat Commun* 11, 428 doi:10.1038/s41467-019-14292-9
- [21] Naoto Nagaosa & Yoshinori Tokura (2013). *Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions*, *Nature Nanotechnology* 8, 899–911(2013), doi:10.1038/nnano.2013.243
- [22] M. Zelent, J. Tóbiş, M. Krawczyk, K. Y. Guslienko, and M. Mruczkiewicz (2017) Bi-stability of magnetic skyrmions in ultrathin multilayer nanodots induced by magnetostatic interaction, *Phys. Status Solidi RRL* 10/2017 doi: 10.1002/pssr.201700259
- [23] «The design and verification of mumax3», *AIP Advances* 4, 107133 (2014).