

ISSN 0868-7129

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. К.А. ВАЛИЕВА

ТРУДЫ ФТИАН

Основаны в 1991 году

Главный редактор
член-корреспондент РАН В. Ф. ЛУКИЧЁВ

Том 31

КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ,
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА
физика, технология, диагностика
и моделирование

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
Т.М. МАХВИЛАДЗЕ

МОСКВА НАУКА 2023

Рецензенты:

*доктор технических наук П.П. Мальцев,
доктор физико-математических наук К.В. Руденко*

Труды Физико-технологического института / гл. ред. В.Ф. Лукичѳв ; Физико-технологич. ин-т им. К.А. Валиева РАН. – М. : Наука, 1991 – . – ISSN 0868-7129.

Т. 31: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника : физика, технология, диагностика и моделирование / отв. ред. Т.М. Махвиладзе. – 2023. – 135 с. – ISBN 978-5-02-040972-9.

Том 31 Трудов ФТИАН посвящен актуальным проблемам технологии нано- и микроэлектроники. В сборник включены статьи, в которых представлены последние результаты сотрудников института по разработке физических основ, моделированию и оптимизации процессов формирования, функционирования и технологии изготовления перспективных элементов, структур, приборов и устройств нано- и микроэлектроники, их деградации и долговечности в ходе эксплуатации. Большое внимание уделено, в частности, результатам, относящимся к исследованию устойчивости интерфейсных структур, которая во многом определяет время жизни актуальных планарных и объемных ИС в условиях сильного электромиграционного массопереноса и механических воздействий.

Для широкого круга специалистов в области квантовых информационных технологий, микро- и наноэлектроники, а также студентов и аспирантов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-040972-9

- © Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, 2023
- © Российская академия наук и издательств о «Наука», продолжающееся издание «Труды ФТИАН» (разработка, оформление), 1991 (год основания), 2023
- © ФГБУ Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2023

УДК 537.624; 537.611.2

О.С. ТРУШИН, Н.И. БАРАБАНОВА

МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЕРМИОНОВ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

*Ярославский филиал Физико-технологического института
им. К. А. Валиева РАН*

Введение

Магнитная запись информации – это хорошо отработанная и проверенная временем технология. Ее дальнейшее развитие предполагает переход к наноразмерным структурам и изменение способов манипуляции магнитными состояниями. Одним из перспективных направлений прогресса в этой области является концепция трековой памяти. Первоначально в рамках данной концепции предполагалось использование доменных стенок в магнитных нанопроводах в качестве носителей информации [1]. При этом для перемещения доменных стенок использовался спин-поляризованный ток. Однако этот подход характеризуется существенным энергопотреблением и недостаточной стабильностью магнитного состояния в условиях внешних полей. В дальнейшем, для решения этих проблем, было предложено вместо доменных стенок использовать скирмионы.

Скирмионы – это особые вихревые состояния намагниченности, характеризующиеся ненулевым топологическим зарядом. Благодаря этому они являются более устойчивыми по отношению к тепловым флуктуациям. Скирмионы могут быть получены в магнитных тонкопленочных структурах, при наличии перпендикулярной магнитной анизотропии и взаимодействия Дзялошинского–Мория.

В тонких магнитных пленках могут существовать только скирмионы Нееля (рис. 1). Здесь острия конусов указывают направление намагниченности в данной точке. На этом рисунке показаны вид сверху (*a*) и вид сбоку на пленку (*b*), содержащую скирмион.

Минимальные размеры скирмионов в этих системах могут достигать 10 нм. Их также можно перемещать с помощью спин-поляризованного тока. При этом ток, требуемый для их перемещения в нанопроводах, намного ниже, чем

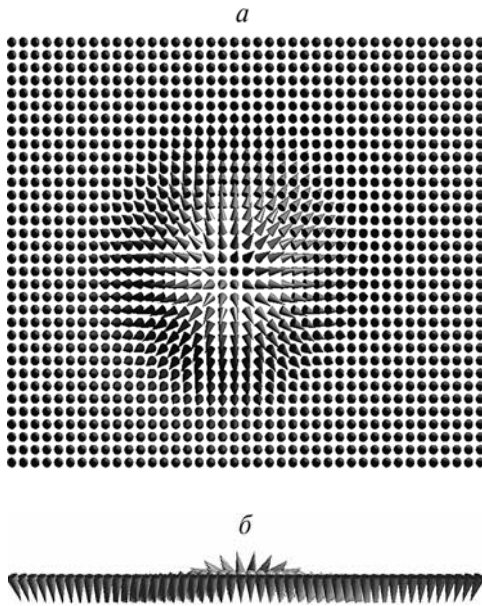


Рис. 1. Скирмион Нееля в магнитной пленке: *a* – вид сверху; *b* – вид сбоку

Чтение информации осуществляется с помощью считывающего элемента на основе магниторезистивного сенсора [3].

Для реализации данной концепции памяти необходимо выяснение фундаментальных механизмов управления скирмионными состояниями на всех этапах обработки информации. Целью настоящей работы было проведение развернутого теоретического анализа возможностей реализации трековой памяти на скирмионах. Данный анализ проведен в рамках микромагнитной модели.

1. Микромагнитная модель

Основная физика зарождения и перемещения скирмионов может быть описана в рамках современной микромагнитной теории. Микромагнитная модель предполагает феноменологическое описание магнитной системы как сплошной среды. При этом намагниченность является непрерывной функцией координат. В рамках этой модели предполагается, что магнетик является однородным и намагниченность насыщения постоянная величина (феноменологический параметр). Тогда полная энергия магнетика является функционалом намагниченности. В ферромагнитных материалах полная энергия системы может быть рассчитана в виде суммы пяти слагаемых

$$E_{\text{tot}} = E_e + E_a + E_z + E_d + E_{\text{DMI}}, \quad (1)$$

где E_e – энергия квантового обменного взаимодействия; E_a – энергия магнитокристаллической анизотропии; E_z – энергия взаимодействия с внешним

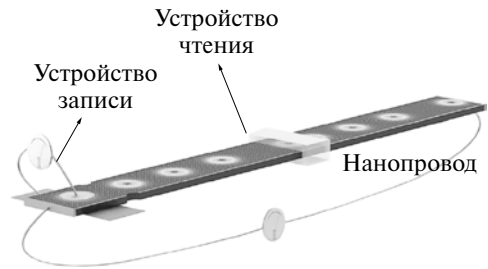


Рис. 2. Трековая память на скирмионах

в случае доменных стенок. В настоящее время по этой причине исследованию скирмионов посвящено значительное число работ [2]. На рис. 2 представлена упрощенная схема трековой памяти на основе транспорта скирмионов. Здесь записывающий элемент создает скирмионы в нанопроводе. Транспорт скирмионов в нанопроводе осуществляется путем пропускания спин-поляризованного тока.

полем (энергия Зеемана); E_d — энергия дальнедействующего магнитоэлектростатического взаимодействия (энергия размагничивающего поля, demagnetizing field); E_{DMI} — энергия взаимодействия Дзялошинского—Мория.

Каждое магнитное состояние системы является локальным минимумом такого функционала. Отсюда задача микромагнитного моделирования состоит в нахождении такого распределения намагниченности в образце, которое обеспечивает минимизацию полной энергии (1). Для решения этой задачи применяют методы численного моделирования с использованием мощных вычислительных комплексов. Численная реализация данной модели предполагает пространственную дискретизацию всего объема системы с помощью мелкой сетки. Локальные магнитные моменты ячеек задаются в узлах сетки, и полная энергия системы может быть вычислена, как сумма по ячейкам. Размеры ячеек должны быть достаточно малы, чтобы корректно описывать все виды взаимодействий. В настоящее время метод микромагнитного моделирования стал весьма популярным инструментом теоретических исследований микро- и наноразмерных магнитных структур. Для обеспечения надежности получаемых результатов расчеты были выполнены с использованием двух независимых программ микромагнитного моделирования: 1) комплекс собственной разработки MICROMAG [4]; 2) широко известный пакет MUMAX3 [5].

2. Генерация скирмионов

В настоящее время в литературе описаны различные способы генерации скирмионов в магнитных пленках путем воздействия на систему возмущающих внешних электрических и магнитных полей, а также импульсов тока и световых импульсов. В работе [6] экспериментально продемонстрирован способ создания скирмиона с помощью иглы сканирующего туннельного микроскопа. Однако наиболее реалистичный, на наш взгляд, способ (для практической реализации) получения скирмионов показан в работе [7], где рассмотрены процессы взаимного превращения двойной доменной стенки в скирмион и обратно.

Дело в том, что скирмион может быть стабилен только в достаточно широких нанопроводах (шириной более 40 нм). В узких нанопроводах могут существовать только доменные стенки. Поэтому, создав участок нанопровода с резким изменением ширины, можно добиться превращения двойной доменной стенки в скирмион и обратно.

Рассмотрим эти процессы более подробно с использованием микромагнитной модели. Для описания магнитного слоя Co были использованы следующие феноменологические параметры: константа обменного взаимодействия $A = 15.0 \cdot 10^{-12}$ Дж/м; константа одноосной анизотропии $K_1 = 0.7 \cdot 10^6$ Дж/м³; намагниченность насыщения $M_s = 580 \cdot 10^3$ А/м; константа демпфирования $\alpha = 0.3$; коэффициент неадиабатичности $\beta = 0.3$; степень поляризации тока $p = 1.0$. Размер пространственной сетки составлял $1 \times 1 \times 1$ нм. На рис. 3 представлен общий вид модели нанопровода с изменяющейся шириной.

В той части провода, где его ширина мала (12 нм), программными средствами была создана магнитная структура, состоящая из пары доменных стенок (рис. 4).

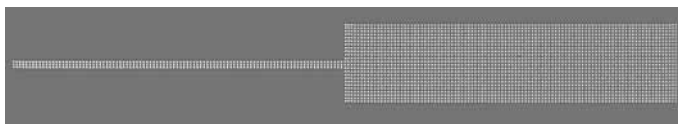


Рис. 3. Общий вид модели нанопровода: стрелки обозначают локальные векторы намагничивания, расположенные в узлах пространственной сетки

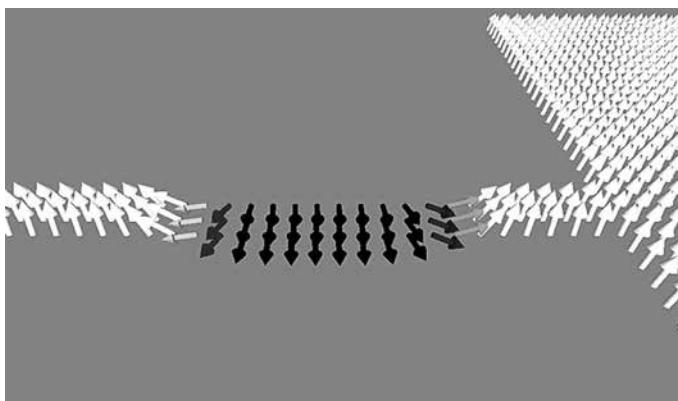


Рис. 4. Двойная доменная стенка в узкой части нанопровода

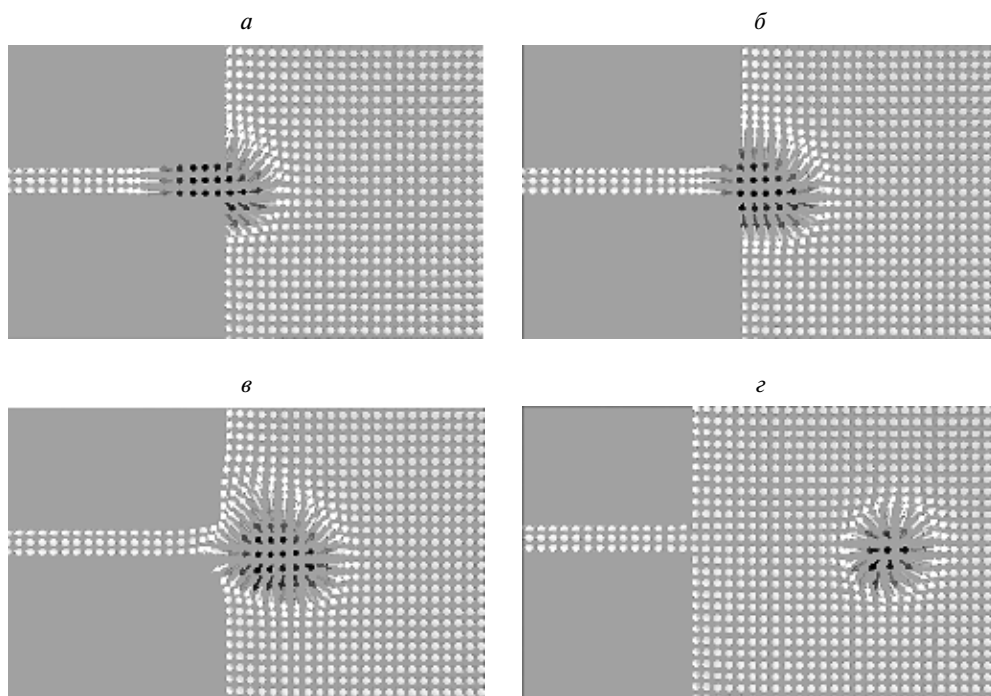


Рис. 5. Процесс превращения двойной доменной стенки в скирмион. Пояснения см. в тексте

По кобальтовому нанопроводу был пущен спин-поляризованный ток с плотностью $1.8 \cdot 10^{13}$ (А/м²), при помощи которого происходило перемещение доменных стенок и скирмиона по нанопроводу. При переходе в область большей ширины (195 нм) данная магнитная конфигурация изменила форму (рис. 5, *a, б*) и преобразовалась в скирмион (рис. 5, *в, г*).

Обратив направление тока в нанопроводе, можно наблюдать обратный процесс превращения скирмиона в двойную доменную стенку. Таким образом, выбор специальной геометрии нанопровода позволяет проводить превращения скирмионов и их создание из доменных стенок. В свою очередь, доменные стенки можно создавать с помощью перемагничивающего импульса внешнего магнитного поля.

Другой важный аспект манипуляции потоком скирмионов состоит в возможности их аккумуляции в отдельных частях нанопроводов. При этом необходимо учитывать взаимное отталкивание скирмионов.

3. Влияние технологических дефектов на транспорт скирмионов

При создании элементов трековой памяти необходимо учитывать фактор влияния возможных технологических дефектов на транспорт скирмионов. Для исследования этого вопроса в данной работе были выполнены ряд расчетов по наблюдению влияния искусственно созданных дефектов. Параметры микромагнитной модели были те же. Полученные описанным ранее методом скирмионы направлялись по нанопроводу в область с дефектом квадратной формы в центре (рис. 6). При этом в условиях отсутствия внешнего поля скирмион «зацеплялся» за дефект и деформировался (рис. 6, *a*). Однако если включалось внешнее магнитное поле, направленное перпендикулярно рисунку, то влияние дефекта на транспорт скирмионов снижалось (рис. 6, *б*) и скирмион проходил область дефекта без разрушения.

Таким образом, внешнее поле позволяет снижать вредное влияние на транспорт скирмионов со стороны технологических дефектов в нанопроводе. Этот факт может быть использован при практической реализации трековой памяти.

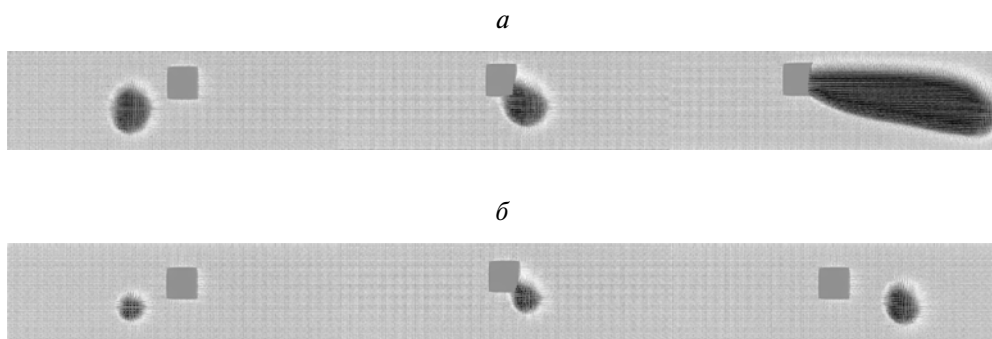


Рис. 6. Прохождение скирмионом технологического дефекта, расположенного на траектории скирмиона и вне края нанопровода размером 25×25 нм, в форме квадрата при внешнем поле $B = 0$ мТл (*a*) и $B = 100$ мТл (*б*)

4. Влияние внешнего поля и уничтожение скирмионов

Важным фактором, влияющим на скирмионы в ферромагнитном нанопроводе, является внешнее магнитное поле. Для исследования этого эффекта в рамках вышеописанной микромагнитной модели была проведена серия расчетов для скирмиона в переменном внешнем поле. Поле было направлено перпендикулярно плоскости пленки и менялось с течением времени по закону синуса с амплитудой $A = 100$ мТ и частотой f , изменяющейся в диапазоне от 0.1 до 20 ГГц. При этом наблюдались осцилляции радиуса скирмиона в переменном внешнем поле (рис. 7).

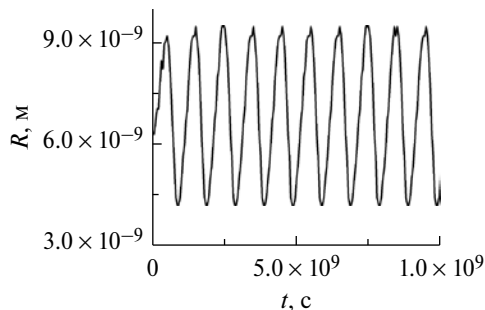


Рис. 7. Осцилляции радиуса скирмиона в переменном внешнем поле с амплитудой 100 мТ и частотой 10 ГГц

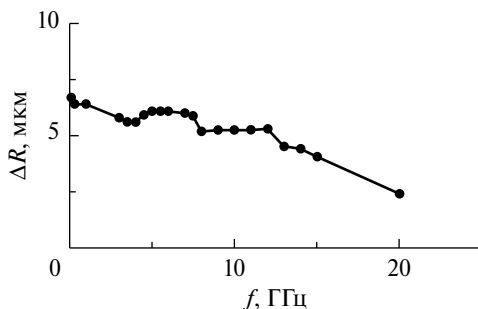


Рис. 8. Зависимость амплитуды осцилляций от частоты внешнего поля

По результатам проведенных исследований была построена зависимость амплитуды осцилляций от частоты внешнего поля, показанная на рис. 8.

Как видно из данных рисунка, наблюдается выраженная тенденция уменьшения амплитуды осцилляций с ростом частоты внешнего поля. В свою очередь, увеличение амплитуды внешнего поля приводит к увеличению амплитуды осцилляций. Но в поле с амплитудой более 200 мТ происходит уничтожение скирмиона. Полученные результаты согласуются с данными работы [8].

Выводы

Таким образом, подводя итоги данных исследований, можно сделать следующие выводы: 1) одним из практически реализуемых методов генерации скирмионов является превращение двойной доменной стенки в скирмион при прохождении уширения нанопровода; 2) транспорт скирмионов в нанопроводе чувствителен к наличию технологических дефектов, влияние которых можно снизить, вводя внешнее магнитное поле; 3) скирмионы чувствительны к внешнему полю и могут быть разрушены полем с амплитудой более 200 мТ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0018: «Фундаментальные и поисковые исследования в области создания приборных структур и активных сред для хранения информации на основе элементов спинтроники и мемристорного эффекта».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parkin S.S.P., Hayashi M., Thomas L.* Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory // *Science*. 2008. Vol. 320. P. 190.
2. *Nagaosa N., Tokura Y.* Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions // *Nat. Nanotech.* 2013. Vol. 8. P. 899–911.
3. *Fert A., Cros V., Sampaio J.* Skyrmions on the track // *Nat. Nanotech.* 2013. Vol. 8. P. 152–156.
4. *Трушин О. С., Барабанова Н. И.* Комплекс программ микромагнитного моделирования MICROMAG и его использование для исследования элементов спинтроники // *Микроэлектроника*. 2013. Т. 42. № 3. С. 1–8.
5. *Vansteenkiste A., Lellaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., van Waeyenberge B.* The design and verification of MUMAX3 // *AIP Advanc.* 2014. Vol. 4. P. 107133.
6. *Hsu P.-J., Kubetzka A., Finco A., Romming N., von Bergmann K., Wiesendanger R.* Electric-field-driven switching of individual magnetic skyrmions // *Nat. Nanotech.* 2017. Vol. 12. P. 123–126.
7. *Zhou Y., Ezawa M.* A reversible conversion between a skyrmion and a domain-wall pair in a junction geometry // *Nat. Commun.* 2014. Vol. 5. P. 4652.
8. *Moon K.-W., Kim D.-H., Je S.-G., Chun B. S., Kim W.* et. al. Skyrmion motion driven by oscillating magnetic field // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 20360.