

УДК 537.622.4

Оригинальная статья

Исследование магнитных свойств нанокompозита Co-Fe

А.Ю. Саломатина^{1,2}, А.Ю. Федотов¹, О.Ю. Северюхина¹, Ф.А. Виноградов²

ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»

426067, Россия, Удмуртская Республика, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

udnc@udman.ru

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени

М.Т. Калашникова»

426069, Россия, Удмуртская Республика, Ижевск, ул. Студенческая, 7

info@istu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.267

Аннотация: В данной работе проведен сравнительный анализ характеристик, преимуществ и недостатков пяти различных типов магниторезистивной оперативной памяти. Так же проведена работа по подбору оптимальной математической модели для исследования состава и структуры материалов для устройств спинтроники. Представлен обзор комбинированной математической модели, состоящей из метода молекулярной динамики и модели спиновой динамики частиц с потенциалом межатомного взаимодействия основанном на модифицированном методе погруженного атома. Так же в работе показан анализ моделирования магнитных свойств двухслойной пленки из кобальта и железа в условиях равномерного внешнего магнитного поля. Слой железа характеризовался образованием скирмионов, а в нанопленках кобальта были обнаружены области с различными магнитными доменами. Было обнаружено, что общая намагниченность системы *Co-Fe* низкая из-за отсутствия приоритетного направления магнитного момента. Была произведено сравнение нормы намагниченности отдельно кобальта, железа разной толщины и системы *Co-Fe* в целом.
Ключевые слова: спинтроника, магниторезистивная оперативная память, математическое моделирование, молекулярная динамика, спиновая динамика, модифицированный метод погруженного атома, LAMMPS, скирмионы.

1. Введение

Магниторезистивная память (MRAM – magnetoresistive random access memory) доказала свое право на существование как одна из самых эффективных, наименее энергозатратных и достаточно компактных. Структура MRAM основывается на спиновом клапане с гигантским магнетосопротивлением и состоит из трех слоев: двух слоев ферромагнетика и изолирующей нанопленки между ними. Направление намагниченности одного слоя ферромагнетика зафиксировано, а другой же слой свободен и может менять свое направление намагниченности.

В различных случаях помимо ферромагнетиков в спиновом калане применяются и другие материалы такие, как антиферромагнетики, сверхпроводники, парамагнетики и др. Антиферромагнетики (АФМ), например, используются для улучшения характеристик устройств магниторезистивной памяти с произвольным доступом. В Toggle-MRAM антиферромагнетик используется как фиксатор магнитного момента нижнего слоя синтетического антиферромагнетика [1], а также как

компонент, обеспечивающий лучшую термическую стабильность устройств. А в магниторезистивной памяти с переносом спинового момента (STT-MRAM – spin-transfer torque MRAM) [2] антиферромагнетик служит для замыкания магнитного потока и устранения чистой намагниченности. В магниторезистивной памяти со спин-орбитальным моментом (SOT-MRAM – spin-orbit torque MRAM) АФМ применяется в бесполеовом переключении SOT [3]. В такой структуре используются два слоя антиферромагнетика (могут быть коллинеарные и неколлинеарные). В MRAM с термическим воздействием (TA-MRAM – thermally assisted MRAM) встречаются два антиферромагнетика с разной температурой блокировки [4]. АФМ с более высокой температурой блокировки связан с фиксированным слоем, а АФМ с более низкой температурой блокировки – со свободным слоем. Благодаря антиферромагнетикам TA-MRAM имеет хорошую термостабильность, селективность записи и слабо восприимчива к внешнему магнитному полю. В памяти с обменным смещением (EB-MRAM – exchange bias MRAM) интересна граница раздела АФМ/ферромагнетик, так как именно там появляется обменное смещение. Обменное смещение в такой памяти используется в качестве носителя информации. Вместе со спин-орбитальным моментом обменное смещение на границе раздела АФМ/ферромагнетик дает отличные результаты для будущих исследований и дальнейших применений EB-MRAM [5]. В Таблице 1 показаны характеристики различных разновидностей магниторезистивной памяти. Каждая из них обладает как рядом преимуществ, так и рядом недостатков, особенно это касается сложностей в процессе ее производства. На данный момент на практике реализовано только три вида магниторезистивной памяти из представленных – Toggle-MRAM, STT-MRAM и SOT-MRAM, остальные находятся в стадии разработки. В силу своей энергонезависимости и возможности хранить данные очень долгое время, данные типы MRAM могут применяться в персональных компьютерах, мобильных телефонах, аэрокосмических и военных системах, смарт-картах, а также в специальных устройствах для регистрации данных. Подводя итог обзора различных видов MRAM, можно сделать вывод, что в любой из представленных разновидностей памяти возможно использование структуры ферромагнетик-сверхпроводник в качестве спинового клапана или магнитного туннельного перехода. Особенно это справедливо для TA-MRAM, так как температуры блокировки магнитных материалов являются очень низкими (1,5-2 К). С помощью аппарата математического моделирования может быть подобран такой состав и структура ячеек памяти, при которых их недостатки можно будет уменьшить или свести к минимуму, а характеристики устройств памяти – оптимизировать.

Таблица 1. Сравнительная характеристика MRAM.

Вид памяти	Быстродействие	Размерность ячейки	Достоинства	Недостатки
Toggle-MRAM	~35 нс [6]	130 нм	– термостабильность; – долговечность; – широкий температурный диапазон.	– необходимо внешнее магнитное поле.
SOT-MRAM	0,2 нс [7]	60-80 нм	– повышенная долговечность; – скорость переключения; – надежность.	– трудность в производстве.
STT-MRAM	~10 нс [8]	45 нм	– изменение намагниченности возникает за счет переноса спинового момента, а не внешнего магнитного поля.	– длительное время инкубации; – малая долговечность; – трудность в производстве.
TA-MRAM	0,5 нс [4]	65 нм	– термостабильность; – селективность записи; – невосприимчивость к внешнему магнитному полю.	– энергопотребление не оптимизировано; – выбор материалов ограничен.
EB-MRAM	~10 нс [5]	нет данных	– переключение осуществляется без внешнего магнитного поля; – высокая пороговая плотность; – потенциальное применение в нейроморфных вычислениях.	– трудоемкость производства.

2. Математическая модель исследования

В данной работе используется математическая модель, которая складывается из нескольких составляющих. За основу был взят метод молекулярной динамики, который используется для описания системы с помощью интегрирования уравнений движения частиц этой системы. Этот метод является целесообразным инструментом для исследования тонких пленок, так как позволяет получать информацию на атомном уровне, моделировать процессы, зависящие от времени и исследовать чувствительность параметров систем. Магнитные взаимодействия и спиновые эффекты описывались с помощью модели спиновой динамики частиц. Используемая методика включает в себя моделирование пространственного положения атомов и их магнитных спинов. Динамика этих магнитных спинов может использоваться для моделирования широкого диапазона явлений, связанных с магнитоупругостью, или для изучения влияния дефектов на магнитные свойства материалов. Магнитные спины взаимодействуют друг с другом и с решеткой посредством парных взаимодействий.

Моделирование релаксационных процессов в магнитомеханической системе осуществлялось при помощи уравнения Ланжевена [9] и стохастического уравнения Ландау – Лифшица – Гилберта [10]. Совместное решение этих уравнений лежит в основе модели спиновой динамики частиц, использованной в работе:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \Phi_i - \kappa v_i + \chi(t), \quad \Phi_i = -\nabla U(r) = -\frac{\partial U(r)}{\partial r_i}, \quad (1)$$

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{1}{(1+\lambda^2)} \left((\omega_i + \eta(t)) \times s_i + \lambda s_i \times (\omega_i \times s_i) \right), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где Φ_i – межатомные силы, обусловленные действием градиента потенциала $U(r)$, κ – коэффициент силы вязкого трения, пропорциональной скорости атома v_i , $\chi(t)$ – белый шум, участвующий в описании стохастического процесса движения атома и возникающий за счет соударений частиц, λ – демпфирующий спиновый коэффициент, $\eta(t)$ – белый шум, характеризующий спиновое поведение системы, ω_i – произведение гиромагнитного отношения на локальное магнитное поле, в котором находится спин.

В качестве потенциала в работе используется модифицированный метод погруженного атома (МЕАМ – modified embedded atom method) [11]. Данный вид потенциала основывается на теории функционала электронной плотности, является многочастичным, поэтому при его описании в скобках указывается совокупность всех радиус-векторов атомов $r = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ и определяется следующим уравнением:

$$U(r) = \sum_i U_i(r) = \sum_i \left(F_i(\bar{\rho}_i) + \frac{1}{2} \sum_{j, j \neq i} \phi_{ij}(r_{ij}) \right), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где $U_i(r)$ – потенциальная энергия отдельных атомов системы, F_i – функция погружения i -го атома, $\phi_{ij}(r_{ij})$ – парный потенциал между двумя рассматриваемыми атомами. Потенциал модифицированного метода погруженного атома имеет довольно большой набор входных параметров, что в некоторой степени ограничивает работу с ним. Тем не менее, на данный момент накоплена достаточно большая база параметров МЕАМ для различных химических элементов, что, безусловно, упрощает и актуализирует его использование. МЕАМ является многочастичным потенциалом, обеспечивающим точное описание металлических связей и свойств. Его способность обрабатывать взаимодействия между частицами, эффективность вычислений и способность к переносу на различные состав и условия делают его разумным выбором для изучения металлов и сплавов. Описанная математическая модель широко протестирована и

является оптимальной для исследования тонких пленок на магнитные свойства. Было проведено исследование на сходимость параметров. Значения магнитной энергии и нормы намагниченности данного исследования совпадают с тестовыми расчетами [12].

3. Исследование структуры и свойств ферромагнетик-сверхпроводник

Вычислительный эксперимент был ориентирован на исследование магнитных свойств слоистого нанокompозита кобальта (8000 атомов) и железа (3200 атомов) в условиях постоянного магнитного поля. Вектор магнитной индукции $B_{ext} = 0,1$ Тл был направлен вдоль оси x , как это показано на рис. 1 а.

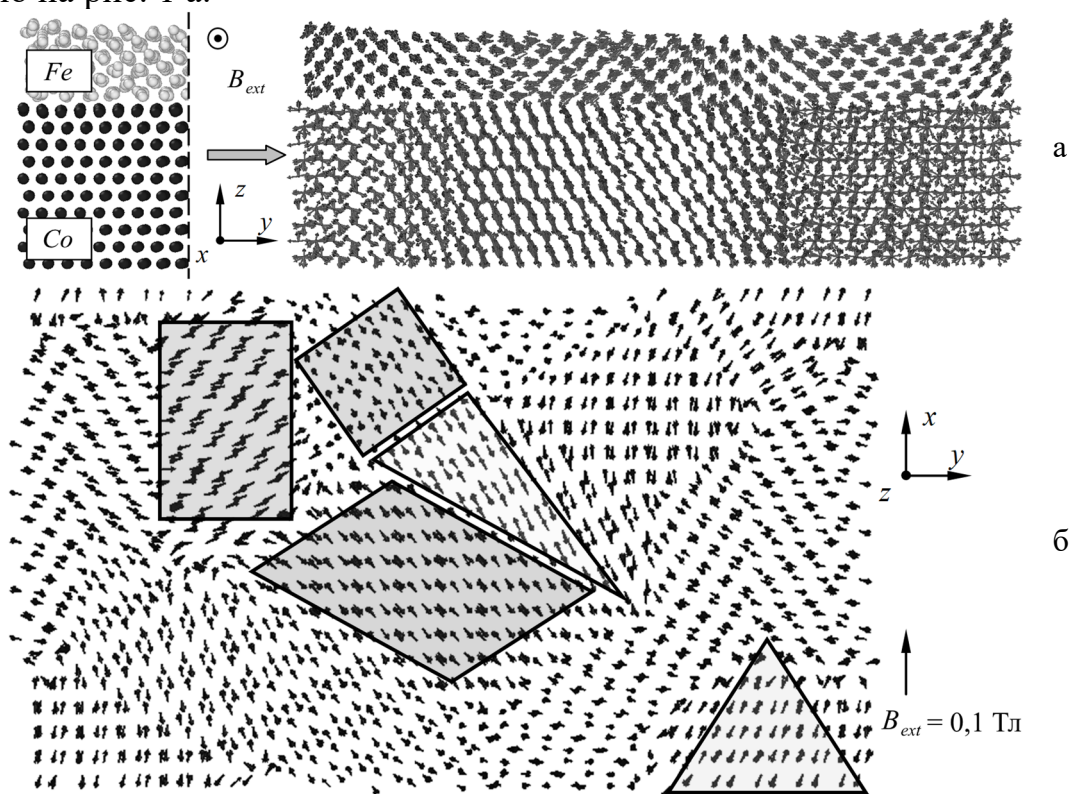


Рис. 1. Распределение магнитных моментов атомов в тонкопленочном нанокompозите $Co-Fe$ (а), формирование доменных магнитных областей в нанопленке кобальта (б).

Материалы имели кристаллическое строение. По горизонтальным направлениям расчетная ячейка имела периодические граничные условия, в направлении оси z , действовали граничные условия отражения. Начальные вектора скоростей и спинов атомов задавались случайным образом в соответствии с начальными термодинамической и спиновой температурами $T = T_s = 8$ К. Результат спиновой динамики двухкомпонентных систем $Co-Fe$ в момент времени моделирования 10 пс представлен на рис. 1 а. В начальные моменты времени магнитные моменты атомов как в нанопленке кобальта, так и в нанопленке железа были разнонаправленными. В дальнейшем наблюдалось совместное

изменение ориентации спинов атомов материалов. Для слоя *Fe* было более характерно формирование вихревых магнитных областей и скирмионов [13]. Магнитное поведение нанопленки *Co* отличалось от характера взаимной ориентации спинов в *Fe*. Получены достаточно четко выраженные магнитные доменные области, которые хорошо идентифицируются на рис. 1 б. Доменные магнитные зоны, приведенные на рис. 1 б и выделенные разными геометрическими фигурами, имеют отличную друг от друга пространственную ориентацию спиновых векторов. Внутри выделенных областей наблюдается согласованная однотипная ориентация спинов атомов. Форма доменов различается. На стыке магнитных областей происходит поворот спиновых векторов атомов. Однако общая намагниченность системы невысока по причине отсутствия ярко выраженного приоритетного направления магнитных моментов. Зонный характер магнетизма нанопленки *Co* является причиной увеличенной поляризации спинов электронов проводимости, что может быть использовано при создании новых пленочных структур и магнитных нанообъектов в устройствах сверхплотной записи и хранения информации.

Среднестатистическую динамику движения атомов и изменения их спинов можно оценить при помощи вычисления температур системы. Изменение термодинамической T_l и спиновой T_s температур исследуемого композита проиллюстрировано на рис. 2 а. Анализ графика температур показывает, что в начальные моменты времени наблюдаются значительные изменения и скачки данных параметров. Подобный эффект объясняется стохастическими начальными распределениями скоростей и магнитных моментов атомов. В дальнейшем скорости и направления спинов, которые были нестабильны в начальном состоянии, перестраиваются, флуктуации величин становятся умеренными. Динамика температур выходит на стационарные режимы, соответствующие величине термостатов 8 К. Незначительные колебания температур вблизи целевого значения свидетельствуют о том, что композит находится в энергетически стабильном состоянии, а термодинамический и спиновый термостаты адекватно функционируют в системе. Для слоистого нанокompозита кобальт-железо в работе было вычислено изменение нормы намагниченности, которое приведено на рис. 2 б.

Норма намагниченности определялась как для всего композита в целом (метка *Co+Fe* ($h = 1$ нм)), так и по отдельности для кобальта (метка *Co*) и железа (метка *Fe* ($h = 1$ нм)). Дополнительно было проведено исследование магнитного поведения такой же системы, но с увеличенной в 2 раза толщиной нанопленки железа (метка *Fe* ($h = 2$ нм)). Магнитные моменты доменной структуры, возникающей в кобальте, являются разнонаправленными, что обуславливает значение нормы

намагниченности данной нанопленки близкое к нулю. Как видно из рис. 2 б, выстраивание доменов происходит достаточно быстро (в течение первой пикосекунды моделирования), и в дальнейшем величина нормы намагниченности кобальта меняется незначительно.

Динамика нормы намагниченности нанопленок железа имеет более изменчивый характер. Это связано с тем, что для возникновения вихревой ориентации спинов атомов требуется более продолжительное время. Кроме того, уже после формирования скирмионов в железе может происходить их некоторое смещение, которое также влияет на изменение нормы намагниченности. Скирмионы в железе обладают четко выраженным магнитным моментом, что приводит к большим значениям нормы намагниченности железа, по сравнению с нанопленкой кобальта. Данный эффект хорошо заметен на рис. 2 б. В варианте вычислительного эксперимента с увеличенной толщиной *Fe* появляются вихревые структуры не только в плоскости нанопленки, но и развернутые в объеме, что обуславливает переориентацию магнитных моментов атомов и, как следствие, увеличение нормы намагниченности материала.

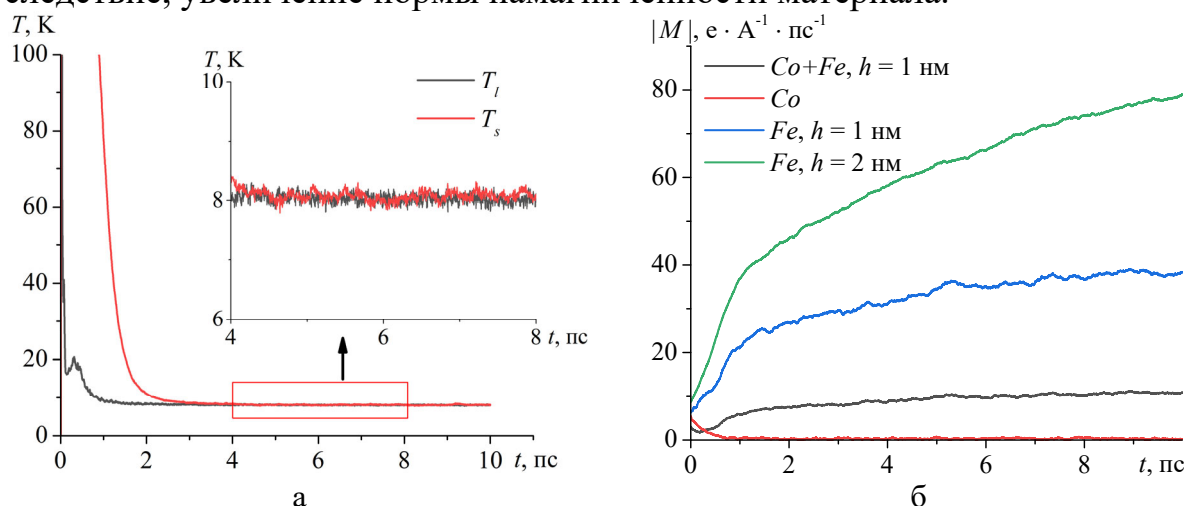


Рис. 2. Графики зависимостей спиновой и термодинамической температур от времени для нанокompозита *Co–Fe* (а), изменение нормы намагниченности в слоях кобальта, железа различной толщины и нанокompозита в целом (б).

Использование скирмионов, полученных в результате моделирования, и джозефсоновских контактов [14] является весьма эффективным направлением в создании быстрых и энергоэффективных устройств памяти, а также в области разработки сверхпроводниковых кубитов и квантовых цепей, ориентированных на новые поколения квантовых процессоров [15]. Однако создание наноразмерных тонкопленочных многослойных материалов и точное управление их магнитными состояниями требует тщательной проработки технологий их изготовления, процессов функционирования, а также расширения представлений о фундаментальных свойствах нанообъектов.

4. Заключение

В работе была проведена сравнительная характеристика различных видов магниторезистивной памяти с произвольным доступом. На данном этапе развития и исследования магниторезистивной памяти произвольного доступа известно о пяти структурах, основанных на разных свойствах спина электрона. При этом каждая из них обладает рядом недостатков и достоинств, что позволяет потенциально использовать их для различных задач. Во всех типах рассматриваемых MRAM возможно использование структуры ферромагнетик-сверхпроводник в качестве спинового клапана или магнитного туннельного перехода. Особенно актуально это для TA-MRAM, так как температуры блокировки магнитных материалов являются очень низкими. В результате моделирования магнитных свойств слоистого нанокompозита кобальта и железа в условиях постоянного магнитного поля наблюдалось формирование скирмионов в нанопленке железа и доменных областей в кобальте. Форма доменов различалась. Магнитные моменты доменной структуры, возникающей в кобальте, являлись разнонаправленными, что обусловило близкое к нулю значение нормы намагниченности данной нанопленки. Железный слой в нанокompозите имел большие значения нормы намагниченности, по сравнению с кобальтом, так как сформированные скирмионы обладали выраженным магнитным моментом. В варианте вычислительного эксперимента с увеличенной толщиной железа были получены вихревые структуры не только в плоскости нанопленки, но и развернутые в объеме.

Материалы, в которых возникают скирмионы, перспективны для устройств спинтроники, в том числе как элемент трековой памяти. Использование скирмионов и джозефсоновских контактов также является весьма эффективным направлением в области разработки сверхпроводниковых кубитов и квантовых цепей для квантовых процессоров, кинетических индукторов для искусственных нейронных сетей с магнитным представлением данных.

Библиографический список:

1. **Dave, R.W.** Toggle MRAM with CoFeB-based synthetic antiferromagnet free layers / R.W. Dave, J. Slaughter, S. Pietambaram et al. // *Proceedings of IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 08-12 May 2006, San Diego, CA, USA. – New York: IEEE Publ., 2006. – P. 398. DOI: 10.1109/INTMAG.2006.376122.
2. **Bishnoi, R.** Improving write performance for STT-MRAM / R. Bishnoi, M. Ebrahimi, F. Oboril, M.B. Tahoori // *IEEE Transactions on Magnetism*. – 2016. – V. 52. – I. 8. – P. 1-11. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2541629.
3. **Oh, Y.W.** Field-free switching of perpendicular magnetization through spin-orbit torque in antiferromagnet/ferromagnet/oxide structures / Y.W. Oh, S.H. Chris Baek, Y.M. Kim et al. // *Nature Nanotechnology*. – 2016. – V. 11. – I. 10. – P. 878-884. DOI: 10.1038/nnano.2016.109.
4. **Prejbeanu, I.L.** Thermally assisted MRAM / I.L. Prejbeanu, M. Kerekes, R.C. Sousa et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2007. – V. 19. – I. 16. – Art. № 165218. – 23 p. DOI: 10.1088/0953-8984/19/16/165218.
5. **Zhu, D.Q.** First demonstration of three terminal MRAM devices with immunity to magnetic fields and 10 ns

- field free switching by electrical manipulation of exchange bias / D.Q. Zhu, Z. X. Guo, A. Du et al. // *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 11-16 December 2021, San Francisco, CA, USA. – New York: IEEE Publ., 2021. – P. 17.5.1-17.5.4. DOI: 10.1109/IEDM19574.2021.9720599.
6. **Nahas, J.** A 4Mb 0.18/spl mu/m 1T1MTJ toggle MRAM memory / J. Nahas, T. Andre, C. Subramanian et al. // *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference (IEEE Cat. No. 04CH37519)*, 15-19 February 2004, San Francisco, CA, USA. – New York: IEEE Publ., 2004. – P. 44-512. DOI: 10.1109/ISSCC.2004.1332585.
7. **Prenat, G.** Ultra-fast and high-reliability SOT-MRAM: From cache replacement to normally-off computing / G. Prenat, K. Jabeur, P. Vanhauwaert et al. // *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*. – 2015. – V. 2. – I. 1. – P. 49-60. DOI: 10.1109/TMSCS.2015.2509963.
8. **Apalkov, D.** Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM) / D. Apalkov, A. Khvalkovskiy, S. Watts et al. // *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC)*. – 2013. – V. 9. – I. 2. – P. 1-35. DOI: 10.1145/2463585.2463589.
9. **Paquet, E.** Molecular dynamics, Monte Carlo simulations, and Langevin dynamics: a computational review / E. Paquet, H.L. Viktor // *BioMed Research International*. – 2015. – V. 2015. – Art. ID 183918. – 18 p. DOI: 10.1155/2015/183918.
10. **Antropov, V.P.** Ab initio spin dynamics in magnets / V.P. Antropov, M.I. Katsnelson, M. Van Schilfgaarde, B.N. Harmon // *Physical Review Letters*. – 1995. – V. 75. – I. 4. – P. 729-732. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.729.
11. **Baskes, M.I.** Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities / M.I. Baskes // *Physical Review B*. – 1992. – V. 46. – I. 5. – P. 2727-2742. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.2727.
12. **Tranchida, J.** Massively parallel symplectic algorithm for coupled magnetic spin dynamics and molecular dynamics / J. Tranchida, S.J. Plimpton, P. Thibaudau, A.P. Thompson // *Journal of Computational Physics*. – 2018. – V. 372. – P. 406-425. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.06.042.
13. **Kang, W.** Skyrmion-electronics: An overview and outlook / W. Kang, Y. Huang, X. Zhang et al. // *Proceedings of the IEEE*. – 2016. – V. 104. – I. 10. – P. 2040-2061. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2591578.
14. **Soloviev, I.I.** Superconducting circuits without inductors based on bistable Josephson junctions / I.I. Soloviev, V.I. Ruzhickiy, S.V. Bakurskiy et al. // *Physical Review Applied*. – 2021. – V. 16. – I. 1. – P. 014052-1-014052-11. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.014052.
15. **Vozhakov, V.A.** State control in superconducting quantum processors / V.A. Vozhakov, M.V. Bastrakova, N.V. Klenov et al. // *Physics-Uspekhi*. – 2022. – V. 192. – I. 5. – P. 457-476. DOI: 10.3367/UFNr.2021.02.038934.

References

1. Dave R.W., Slaughter J., Pietambaram S. et al. Toggle MRAM with CoFeB-based synthetic antiferromagnet free layers, *Proceedings of IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 08-12 May 2006, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Publ., 2006, p. 398. DOI: 10.1109/INTMAG.2006.376122.
2. Bishnoi R., Ebrahimi M., Oboril F., Tahoori M.B. Improving write performance for STT-MRAM, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, vol. 52, issue 8, pp. 1-11. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2541629.
3. Oh Y.W., Chris Baek S.H., Kim Y.M. et al. Field-free switching of perpendicular magnetization through spin-orbit torque in antiferromagnet/ferromagnet/oxide structures, *Nature Nanotechnology*, 2016, vol. 11, issue 10, pp. 878-884. DOI: 10.1038/nnano.2016.109.
4. Prejbeanu I.L., Kerekes M., Sousa R.C. et al. Thermally assisted MRAM, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2007, vol. 19, issue 16, art. no. 165218, 23 p. DOI: 10.1088/0953-8984/19/16/165218.
5. Zhu D.Q., Guo Z.X., Du A. et al. First demonstration of three terminal MRAM devices with immunity to magnetic fields and 10 ns field free switching by electrical manipulation of exchange bias, *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 11-16 December 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Publ., 2021. pp. 17.5.1-17.5.4. DOI: 10.1109/IEDM19574.2021.9720599.
6. Nahas J., Andre T., Subramanian C., Garni B., Lin H., Omair A., Martino W. A 4Mb 0.18/spl mu/m 1T1MTJ Toggle MRAM memory, *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference (IEEE Cat. No. 04CH37519)*, 15-19 February 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Publ., 2004. – p. 44-512. DOI: 10.1109/ISSCC.2004.1332585.
7. Prenat G., Jabeur K., Vanhauwaert P. et al. Ultra-fast and high-reliability SOT-MRAM: From cache replacement to normally-off computing, *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*, 2015, vol. 2, issue 1, pp. 49-60. DOI: 10.1109/TMSCS.2015.2509963.
8. Apalkov D., Khvalkovskiy A., Watts S. et al. Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM), *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC)*, 2013, vol. 9, issue 2, pp. 1-

35. DOI: 10.1145/2463585.2463589.

9. Paquet E., Viktor H.L. Molecular dynamics, Monte Carlo simulations, and Langevin dynamics: A computational review, *BioMed Research International*, 2015, vol. 2015, art. id 183918, 18 p. DOI:10.1155/2015/183918.

10. Antropov V.P., Katsnelson M.I., Van Schilfgaarde M., Harmon B.N. Ab Initio Spin Dynamics in Magnets, *Physical Review Letters*, 1995, vol. 75, issue 4, pp. 729-732. DOI:10.1103/PhysRevLett.75.729.

11. Baskes M.I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities, *Physical Review B*, 1992, vol. 46, issue 5, pp. 2727-2742. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.2727.

12. Tranchida J., Plimpton S.J., Thibaudau P., Thompson A.P. Massively parallel symplectic algorithm for coupled magnetic spin dynamics and molecular dynamics, *Journal of Computational Physics*, 2018, Vol. 372, P. 406-425. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.06.042.

13. Kang, W. Kang W., Huang Y. et al. Skyrmion-electronics: An overview and outlook, *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, issue 10, pp. 2040-2061. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2591578.

14. Soloviev I.I., Ruzhickiy V.I., Bakurskiy S.V. et al. Superconducting circuits without inductors based on bistable Josephson junctions, *Physical Review Applied*, 2021, vol. 16, issue 1, pp. 014052-1-014052-11. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.014052.

15. Vozhakov V. A., Bastrakova M. V., Klenov N. V. et al. State control in superconducting quantum processors, *Physics-Uspekhi*, 2022, vol. 192, issue 5, pp. 457-476. DOI: 10.3367/UFNr.2021.02.038934.

Original paper

Study of Co-Fe nanocomposite magnetic properties

A.Yu. Salomatina^{1,2}, A.Yu. Fedotov¹, O.Yu. Severyukhina¹, F.A. Vinogradov²

¹*Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia*

²*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.267

Abstract: In this paper, a comparative analysis of the characteristics, advantages and disadvantages of five different types of magnetoresistive random access memories has been carried out. An optimal mathematical model for investigation of composition and structure of materials for spintronics devices is selected. A review of the combined mathematical model consisting of the molecular dynamics method and the model of spin dynamics of particles with interatomic interaction potential based on a modified embedded atom method is presented. An analysis is performed of modeling of magnetic properties of cobalt and iron bilayer film under conditions of the uniform external magnetic field. The iron layer was characterized by the formation of skyrmions, while regions with different magnetic domains were found in the cobalt nanofilms. The overall magnetization of the *Co-Fe* system was found to be low due to the lack of the priority direction of the magnetic moment. The magnetization rates of cobalt, iron of different thicknesses and the *Co-Fe* system as a whole were compared separately.

Keywords: *spintronics, magnetoresistive random access memory, mathematical modeling, molecular dynamics, spin dynamics, modified embedded atom method, LAMMPS, skyrmions.*

Саломатина Анастасия Юрьевна – аспирант 2 года обучения, ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН», старший преподаватель ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Федотов Алексей Юрьевич – д.т.н, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»

Северюхина Олеся Юрьевна – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»

Виноградов Федор Андреевич – ведущий инженер ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Anastasia Yu. Salomatina – 2nd year postgraduate student, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Aleksey Yu. Fedotov – Dr. Sc., Leading Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS

Olesya Yu. Severyukhina – Ph. D., Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS

Fedor A. Vinogradov – Leading engineer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Поступила в редакцию/received: 01.07.2024; после рецензирования/revised: 25.07.2024; принята/accepted: 01.08.2024.