

УДК 002.001; 002:001.8

НАНОЧАСТИЦЫ ЭКЗОТИЧЕСКОГО ЭПСИЛОН-ОКСИДА ЖЕЛЕЗА (III) КАК РАБОЧАЯ СРЕДА НАНОМАГНИТНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

А.И. Дмитриев^{a,b}

^a Российский университет транспорта, Москва, 127994, Российская Федерация

^b Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, 142432, Российская Федерация
Адрес для переписки: Alex-dmitriev2005@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.05.17, принята к печати 04.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-805-811

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Дмитриев А.И. Наночастицы экзотического эpsilon-оксида железа (III) как рабочая среда наноманитных логических устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 805–811. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-805-811

Аннотация

Предмет исследования. В работе обсуждаются принципы обработки информации наноманитными логическими устройствами, состоящие в манипулировании намагничённостью отдельных магнитных наночастиц, находящихся в однодоменном состоянии и объединённых в логическую сеть. В однодоменном состоянии наночастицы имеют одноосную магнитную анизотропию, что делает их бистабильной системой, пригодной для двоичного кодирования информации: намагничённости вниз соответствует логический «0», намагничённости вверх – «1». Эти два состояния отделены энергетическим барьером с высотой, равной энергии магнитной анизотропии. Рассматриваемая логическая сеть подразумевает абсолютно новый способ проведения логических операций. Речь идет о сети наноманитов, связанных дипольным взаимодействием и допускающих существование промежуточных фрустрированных состояний, аналогичных квантовой запутанности. **Методы.** Для наноманитных логических устройств нужны материалы с достаточно большей энергией магнитной анизотропии, чтобы термические флуктуации не приводили к потере ориентации магнитного момента и к потере информации. В качестве таковых предложено использовать новые наноманиты на основе эpsilon-фазы оксида железа $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с гигантской магнитной анизотропией. Наночастицы изготовлены комбинацией двух методов – синтезом в обратных мицеллах и золь-гель методом. Элементный анализ наночастиц проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Agilent Technologies, HP 4500). Микрофотографии получены на просвечивающем микроскопе JEOL JEM 2000EXII. Структура наночастиц установлена методом рентгеновской дифракции на приборе Rigaku RINT2100. Исследование магнитных свойств проводили с помощью СКВИД-магнитометра Quantum Design, MPMS 5XL. **Основные результаты.** Предложен новый способ проведения логических операций, который заключается в манипулировании намагничённостью отдельных наночастиц не только с помощью внешнего магнитного поля, но и с помощью варьирования температуры наночастиц $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в условиях спин-переориентационного перехода. В наночастицах $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ обнаружено магнитоэлектрическое взаимодействие, открывающее новые пути решения вопроса считывания битного состояния в рассматриваемых устройствах. Созданы экспериментальные условия для выполнения логических операций в упорядоченных массивах наночастиц $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. **Практическая значимость.** Температурная манипуляция направлением вектора намагничённости открывает новые возможности создания устройств наноманитной логики и спинтроники в условиях сильной анизотропии, когда магнитные поля, требуемые для переключения направления намагничённости (а значит, изменения битового состояния), становятся неприемлемо большими. Обсуждаемые в работе принципы способны обеспечить бездиссипативную обработку информации в энергетическом пределе, близком к оценкам Ландауэра, где на первый план выходят термодинамические аспекты.

Ключевые слова

наноманитное логическое устройство, обработка информации, наночастица, магнитная анизотропия, магнитное дипольное взаимодействие

Благодарности

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3. Автор благодарен В.П. Соловьеву за полезные обсуждения.

NANOPARTICLES OF EXOTIC EPSILON-IRON OXIDE (III) AS THE WORKING ENVIRONMENT OF NANOMAGNETIC LOGIC DEVICES

A.I. Dmitriev^{a,b}

^aRussian University of Transport, Moscow, 127994, Russian Federation

^bInstitute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432, Russian Federation

Corresponding author: Alex-dmitriev2005@yandex.ru

Article info

Received 25.05.17, accepted 04.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-805-811

Article in Russian

For citation: Dmitriev A.I. Nanoparticles of exotic epsilon-iron oxide (III) as the working environment of nanomagnetic logic devices. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 805–811 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-805-811

Abstract

Subject of Research. The paper discusses the principles of information processing by nanomagnetic logic devices consisting in the magnetization manipulation of individual magnetic nanoparticles in a single-domain state and combined into a logical network. In a single-domain state, nanoparticles have uniaxial magnetic anisotropy that makes them a bistable system suitable for binary coding of information: the magnetization downwards corresponds to a logical "0", the magnetization upwards is "1". These two states are separated by an energy barrier with the height equal to the energy of the magnetic anisotropy. The logical network in question implies an entirely new way for performing of logical operations. The point at issue is about a network of nanomagnets connected by a dipole interaction and admitting the existence of intermediate frustrated states, analogous to quantum entanglement. **Methods.** Materials with sufficiently high magnetic anisotropy energy are required for nanomagnetic logic devices to ensure that thermal fluctuations do not lead to orientation loss of magnetic moment and the loss of information. As such, we proposed to use new nanomagnets based on the epsilon phase of iron oxide $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ with giant magnetic anisotropy. Nanoparticles are produced by a combination of two methods: synthesis in reverse micelles and a sol-gel method. Elemental analysis of nanoparticles was carried out by mass spectrometry with inductively coupled plasma (Agilent Technologies, HP 4500). Photomicrographs were obtained by the JEOL JEM 2000EXII transmission microscope. The structure of nanoparticles is determined by X-ray diffraction on a Rigaku RINT2100 instrument. Study of the magnetic properties was carried out with the use of SQUID magnetometer Quantum Design, MPMS 5XL. **Main Results.** A new method for performing of logical operations is proposed that consists in the magnetization manipulation of individual nanoparticles not only with the aid of an external magnetic field, but also by varying the temperature of the $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles under the conditions of a spin-reorientation transition. In the $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles, a magnetoelectric interaction is discovered that opens new ways for solving the bit state reading problem in the devices under consideration. Experimental conditions for performing of logical operations in ordered arrays of $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles are created. **Practical Relevance.** Temperature manipulation by the vector magnetization direction opens up new possibilities for creating devices for nano-magnetic logic and spintronics under conditions of strong anisotropy, when the magnetic fields required to switch the direction of magnetization (and, hence, the change in the bit state) become unacceptably large. The principles discussed in the paper are capable of providing a nondissipative processing of information in the energy limit close to Landauer's estimates, where thermodynamic aspects come to the fore.

Keywords

nanomagnetic logic device, information processing, nanoparticle, magnetic anisotropy, magnetic dipole interaction

Acknowledgements

The work was partially supported by the RFBR grant No. 16-07-00863a and the Russian Federation President grant MK-5754.2016.3. The author is grateful to V.P. Solov'ev for useful discussions.

Введение

Технологической реализацией вычислительных процессов в компьютерах пятого поколения может стать кодирование информации магнитными спинами. Обработка информации при этом будет состоять в манипулировании намагниченностью магнитных наночастиц, находящихся в однодоменном состоянии и объединенных в логическую сеть. Такая сеть представляет собой наномагнитное логическое устройство [1, 2]. Наномагнитные логические устройства создаются на основе ферромагнитных наночастиц, имеющих значительную одноосную магнитную анизотропию и находящихся в однодоменном состоянии, что делает их бистабильной системой, пригодной для двоичного кодирования информации. Намагниченности вниз соответствует логический «0», намагниченности «вверх» – «1» (рис. 1). Эти два состояния отделены энергетическим барьером, высотой, равной энергии магнитной анизотропии.

Взаимная ориентация намагниченностей двух соседних наночастиц определяется магнитным диполь-дипольным взаимодействием, а значит, зависит от взаимной ориентации наночастиц. Энергия диполь-дипольного взаимодействия W_{ij} зависит от взаимного расположения диполей:

$$W_{ij} = -\mathbf{p}_i \mathbf{p}_j (\cos \theta_{ij} - 3 \cos \theta_i \cos \theta_j) / r_{ij}^3,$$

где \mathbf{p} – дипольный момент; \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j – радиус-векторы диполей с моментами \mathbf{p}_i и \mathbf{p}_j , соответственно; $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$, θ_{ij} – угол между векторами \mathbf{p}_i и \mathbf{p}_j ; θ_i и θ_j – углы между векторами \mathbf{p}_i и \mathbf{p}_j и вектором \mathbf{r}_{ij} . Из формулы видно, что для пары диполей с одинаковыми дипольными моментами \mathbf{p} при «горизонтальной» ориента-

ции дипольных моментов (рис. 2, а) эта энергия минимальна ($W = -2p^2/r^3$), когда дипольные моменты параллельны; при «вертикальной» ориентации дипольных моментов (рис. 2, б) энергия диполь-дипольного взаимодействия минимальна ($W = -p^2/r^3$), когда дипольные моменты антипараллельны [3].

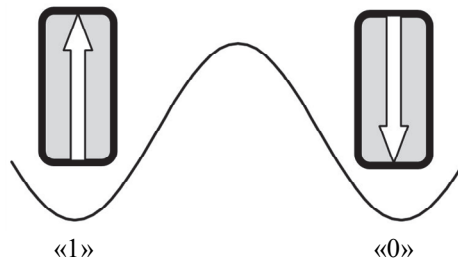


Рис. 1. Схема кодирования информации в однодоменных наночастицах: намагниченности вниз соответствует логический «0», намагниченности «вверх» – «1». Синусоида соответствует зависимости энергии магнитной анизотропии от ориентации вектора намагниченности относительно оси легкого намагничивания

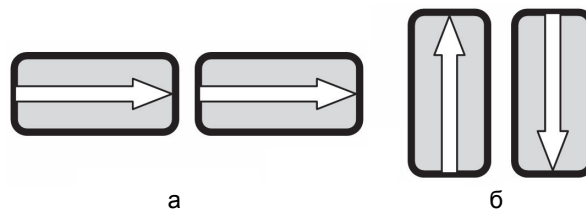


Рис. 2. Схема взаимной ориентации намагниченностей двух соседних наночастиц в зависимости от их взаимной ориентации: при «горизонтальной» ориентации (а); при «вертикальной» ориентации (б)

Рассмотрим принципы функционирования устройств наномангнитной логики на примере мажоритарного логического элемента. Такой элемент работает по «принципу большинства», т.е. если на большинстве его входов будет логическая «1», то и на выходе схемы установится «1»; и наоборот, если на большинстве входов будет логический «0», то и на выходе установится «0». Пусть логическая схема состоит из 7 наночастиц, расположенных друг относительно друга, как показано на рис. 3.

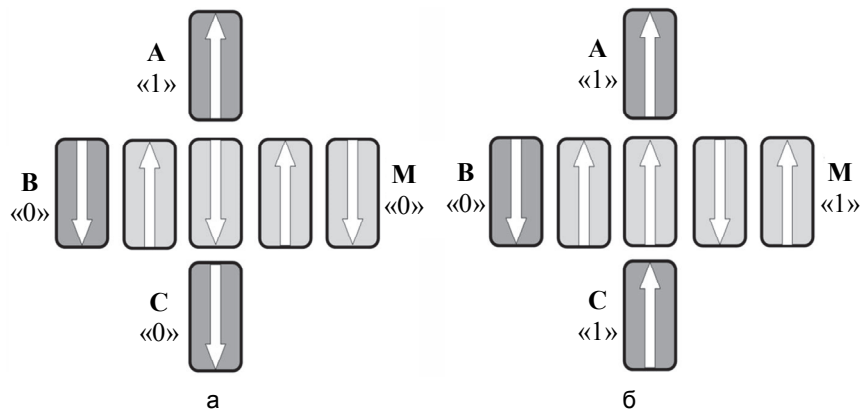


Рис. 3. Схема наномангнитного мажоритарного логического элемента. Буквами **А**, **В**, **С** обозначены входы схемы, буквой **М** – выход: состояние элемента при **А** = 1, **В** = 0, **С** = 0 (а); состояние элемента при **А** = 1, **В** = 0, **С** = 1 (б)

Каждая из наночастиц может быть намагничена либо вниз (такая ориентация намагниченности соответствует логическому «0»), либо вверх (такая ориентация намагниченности соответствует логической «1»). Наночастицы, обозначенные на рис. 3 буквами **А**, **В**, **С**, являются входами логической схемы. Наночастица, обозначенная на рис. 3 буквой **М**, является выходом логической схемы. Ориентация вектора намагниченности наночастиц **А**, **В**, **С** управляется с помощью внешнего воздействия, например, наложением внешнего магнитного поля. Ориентация вектора намагниченности всех остальных наночастиц, включая наночастицу **М**, определяется диполь-дипольным взаимодействием. На рис. 3, а, входные наночастицы внешними силами переведены в конкретные состояния намагниченности: **А** = 1, **В** = 0, **С** = 0. На центральную наночастицу, окруженную наночастицами **А**, **В**, **С**, со стороны **В** и **С** действуют силы, стремящиеся развернуть ее намагниченность вниз, а со стороны **А** действует сила, стремящаяся развернуть его намагниченность вверх. Суммарное действие двух первых сил преобладает, и намагниченность центрального элемента разворачивается вниз. За счет диполь-дипольного взаимодействия намагниченность

наночастицы, расположенной справа от центральной, устанавливается антипараллельно, что, в свою очередь, приводит к намагниченности наночастицы **М** вниз. Это означает, что на выходе устанавливается логический «0» (рис. 3, а). На рис. 3, б, показана другая конфигурация входных сигналов: **A** = 1, **B** = 0, **C** = 1. Рассуждая аналогичным образом, приходим к тому, что на выходе устанавливается логическая «1» (рис. 3, б). Легко видеть, что рассматриваемая комбинация наночастиц, управляемая внешним магнитным полем, в сочетании с диполь-дипольным взаимодействием между отдельными наночастицами выполняет мажоритарную логическую операцию.

Центральным вопросом наномангнитной логики остается вопрос регистрации результата логической операции – считывания битного состояния в рассматриваемых устройствах. На сегодня самым распространенным способом является получение контрастного магнитного изображения на магнитно-силовом микроскопе. Второй способ – с помощью фотоэмиссионной электронной микроскопии [4]. Понятно, что оба метода мало подходят для использования в персональных компьютерах, использующих наномангнитную логику. В связи с этим одним из горячих направлений наномангнитной логики является интеграция туннельных магниторезистивных элементов с наномангнитными логическими устройствами. Сегодня магниторезистивные слои зарекомендовали себя как надежные элементы современных компьютеров: эффект гигантского магнитного сопротивления (ГМС) используется в считывающих головках жестких дисков, а также в технологии магниторезистивной оперативной памяти. Первые попытки создания программируемых ГМС-устройств для наномангнитной логики предприняты в работе [5].

Для наномангнитных логических устройств нужны материалы с достаточно большой энергией магнитной анизотропии, чтобы термические флуктуации не приводили к потере ориентации магнитного момента и к потере информации. Недавно удалось создать новые наномангниты на основе эpsilon-фазы оксида железа $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с гигантской магнитной анизотропией. В условиях сильной анизотропии магнитные поля, требуемые для переключения направления намагниченности (а значит, изменения битового состояния), становятся неприемлемо большими. Это ставит задачу поиска немагнитного механизма управления битовым состоянием в наномангнитных логических операциях. Таковым может быть температурная манипуляция вектором намагниченности в окрестности спин-переориентационного перехода в наночастицах $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Кроме того, в наночастицах $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ обнаружено магнитоэлектрическое взаимодействие, открывающее новые пути решения вопроса считывания битного состояния в рассматриваемых устройствах.

Настоящая работа направлена на создание экспериментальных условий для выполнения логических операций в упорядоченных массивах наночастиц $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с гигантской магнитной анизотропией.

Методика

Наночастицы $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ были изготовлены комбинацией двух методов – синтезом в обратных мицеллах и золь-гель методом. Было приготовлено два раствора обратных мицелл смешиванием бромида цетилтриметиламмония, 1-бутанола, n-октана и воды. Водная фаза первого раствора обратных мицелл содержала растворы $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{In}(\text{NO}_3)_3$. Водная фаза второго раствора обратных мицелл содержала раствор NH_3 . После этого при быстром перемешивании второй раствор обратных мицелл был добавлен в первый раствор обратных мицелл. Затем в раствор добавляли тетраэтоксисилан и перемешивали в течение 24 ч. После этого прекурсор, содержащий наночастицы оксида железа, помещали в матрицу SiO_2 и подвергали отжигу при температуре 1248 К. Для получения ориентированных наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ реакционный раствор выдерживали в течение 24 ч при повышенной температуре в магнитном поле сверхпроводящего магнита напряженностью 20 кЭ. Затем матрицу SiO_2 с наночастицами охлаждали, а магнитное поле отключали, что оставляло оси нанопроволок ориентированными в направлении приложения магнитного поля.

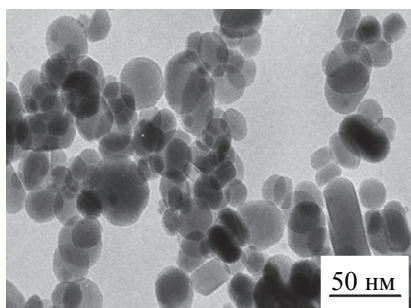


Рис. 4. Изображение наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Элементный анализ наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Agilent Technologies, HP 4500). Микрофотографии наночастиц (рис. 4) были получены на просвечивающем микроскопе JEOL JEM 2000EXII.

Для получения микрофотографий наночастиц предварительно удаляли матрицу SiO_2 травлением в растворе NaOH . Структура наночастиц была установлена методом рентгеновской дифракции на приборе Rigaku RINT2100. Подробно синтез и аттестация наночастиц описаны в работах [6–10].

Исследование магнитных свойств наночастиц проводили с помощью СКВИД-магнитометра Quantum Design, MPMS 5XL. Температурная зависимость намагниченности $M(T)$ в магнитном поле напряженностью $H = 5 \text{ кЭ}$ была измерена при понижении и повышении температуры, что позволило наблюдать температурный гистерезис $M(T)$.

Результаты и обсуждение

Элементный анализ показал, что химическая формула полученных наночастиц – $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$. Методом рентгеновской дифракции было установлено, что наночастицы имеют орторомбическую кристаллическую структуру с пространственной группой $Pna2_1$ и параметрами решетки $a = 0,51409 \text{ нм}$, $b = 0,87807 \text{ нм}$, $c = 0,94661 \text{ нм}$. В структуре имеется четыре неэквивалентных катионных позиции ионов Fe^{3+} в высокоспиновом состоянии $S = 5/2$ благодаря слабому полю лигандов. Одна из них имеет тетраэдрическое окружение, а три другие – октаэдрическое окружение. Ионы индия являются примесью замещения и встраиваются в октаэдрические позиции ионов железа. По микрофотографиям, полученным на просвечивающем микроскопе, был установлен средний диаметр отдельных наночастиц около 25 нм.

На рис. 5, а, изображена температурная зависимость намагниченности $M(T)$ наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ в магнитном поле $H = 500 \text{ Э}$. В окрестности 150 К происходит резкое уменьшение намагниченности практически до нуля, которая при дальнейшем понижении температуры остается почти постоянной.

При 150 К в наночастицах происходит спин-переориентационный переход, приводящий к изменению направления намагниченности (полярности магнитных наночастиц). В зависимости от соотношения вкладов в суммарную магнитную анизотропию от одноионной анизотропии и анизотропии, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием, направление оси легкого намагничивания может быть перпендикулярным или параллельным кристаллографической оси c наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$.

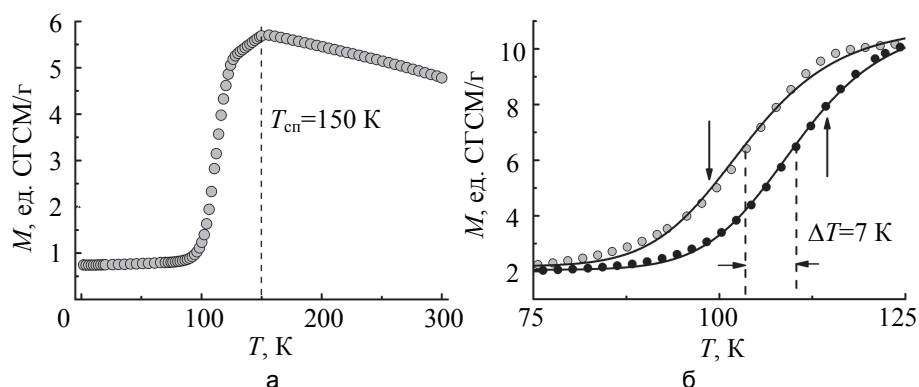


Рис. 5. Температурная зависимость намагниченности M наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$, измеренная в магнитном поле 500 Э. Вертикальной линией показана температура спин-переориентационного перехода $T_{\text{СП}} = 150 \text{ К}$ (а); фрагменты температурных зависимостей намагниченности M наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ в магнитном поле 5 кЭ, измеренные при понижении (серые символы) и повышении температуры (черные символы). Стрелками обозначено направление развертки температуры (б)

Одноионной магнитной анизотропии соответствует ось легкого намагничивания, направленная вдоль кристаллографической оси c . Магнитной анизотропии, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием, соответствует ось легкого намагничивания, перпендикулярная кристаллографической оси c . При температурах ниже 150 К преобладает вклад анизотропии, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием, и ось легкого намагничивания перпендикулярна кристаллографической оси c . При температурах выше 150 К преобладает одноионная магнитная анизотропия, а ось легкого намагничивания направлена параллельно кристаллографической оси c .

В окрестности спин-переориентационного перехода наблюдается температурный гистерезис шириной $\Delta T = 7 \text{ К}$ (рис. 5, б). На рис. 5, б, изображены фрагменты температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ в магнитном поле 5 кЭ, измеренные при понижении и повышении температуры. При охлаждении образца в диапазоне температур $T = 125\text{--}75 \text{ К}$ наблюдается уменьшение намагниченности образца почти до нуля (рис. 5, б). Намагничивание в режиме нагрева происходит при больших температурах (рис. 5, б).

Тепловая манипуляция направлением намагниченности отдельных наночастиц $\epsilon\text{-In}_{0,043}\text{Fe}_{1,957}\text{O}_3$ в окрестности спин-переориентационного перехода открывает новые возможности создания устройств наномангнитной логики и спинтроники в условиях сильной анизотропии, когда магнитные поля, требуемые

для переключения направления намагниченности (а значит, изменения битового состояния), становятся неприемлемо большими. Так, если на отдельную наночастицу воздействовать сфокусированным лазерным лучом, то нагреваемая наночастица способна изменить направление намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля. При этом при выключении лазера и восстановлении температуры наночастицы обратной переориентации намагниченности может не происходить вследствие температурного гистерезиса. На логические операции, выполняемые подобным способом, будет тратиться намного меньше энергии, чем в случае традиционного способа – при помощи воздействия магнитным полем [11]. Кроме того, тепловая манипуляция позволит преодолеть лимит в скорости перемагничивания ферромагнитной наночастицы. Таким образом, обсужденные в работе принципы способны обеспечить бездиссипативную обработку информации в энергетическом пределе, близком к оценкам Ландауэра, где на первый план выходят термодинамические аспекты [12, 13].

Заключение

Сформулированы методы обработки информации (выполнения логических операций) с помощью наномангнитных логических устройств. Предложены принципы устройства мажоритарного логического элемента. В его основе лежит набор суперпарамагнитных наночастиц, объединенных в логическую сеть. Намагниченности наночастиц вниз соответствует логический «0», намагниченности вверх – «1». Эти два состояния отделены энергетическим барьером с высотой, равной энергии магнитной анизотропии. Рассматриваемая логическая сеть подразумевает абсолютно новый способ проведения логических операций. Речь идет о сети наномангнитов, связанных дипольным взаимодействием и допускающих существование промежуточных фрустрированных состояний, аналогичных квантовой запутанности. Предложен новый способ проведения логических операций, который заключается в манипулировании намагниченностью отдельных наночастиц не только с помощью внешнего магнитного поля, но и с помощью варьирования температуры наночастиц $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в условиях спин-переориентационного перехода. Температурная манипуляция направлением вектора намагниченности открывает новые возможности создания устройств наномангнитной логики и спинтроники в условиях сильной анизотропии, когда магнитные поля, требуемые для переключения направления намагниченности (а значит, изменения битового состояния), становятся неприемлемо большими.

Литература

1. Wang J., Meng H., Wanga J.-P. Programmable spintronics logic device based on a magnetic tunnel junction element // *Journal of Applied Physics*. 2005. V. 97. N 10. P. 10D509. doi: 10.1063/1.1857655
2. Niemier M.T., Bernstein G.H., Csaba G., Dingler A., Hu X.S., Kurtz S., Liu S., Nahas J., Porod W., Siddiq M., Varga E. Nanomagnet logic: progress toward system-level integration // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011. V. 23. N 49. P. 493202. doi: 10.1088/0953-8984/23/49/493202
3. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. Т. 1. 704 с.
4. Imre A., Csaba G., Ji L., Orlov A., Bernstein G.H., Porod W. Majority logic gate for magnetic quantum-dot cellular automata // *Science*. 2006. V. 311. N 5758. P. 205–208. doi: 10.1126/science.1120506
5. Patil Sh., Lyle A., Harms J., Lilja D.J., Wang J.-P. Spintronic logic gates for Spintronic data using magnetic tunnel junctions // *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Design*. Amsterdam, Netherlands, 2010. P. 125–131. doi: 10.1109/ICCD.2010.5647611
6. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Magnetic phase transition in $\epsilon\text{-In x Fe}_2\text{-xO}_3$ nanowire // *Physics of the Solid State*. 2013. V. 55. N 11. P. 2252–2259. doi: 10.1134/S1063783413110073
7. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Spin-reorientation transition in $\epsilon\text{-In}_0.24\text{Fe}_1.76\text{O}_3$ nanowires // *Physics of the Solid State*. 2014. V. 56. N 9. P. 1795–1798. doi: 10.1134/S1063783414090091
8. Dmitriev A.I., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Anomalous magnetization dynamics near the spin-reorientation transition temperature in $\epsilon\text{-In}_0.24\text{Fe}_1.76\text{O}_3$ nanowires // *Low Temperature Physics*. 2015. V. 41. P. 20–24. doi: 10.1063/1.4906312
9. Dmitriev A.I., Morgunov R.B. The influence of magnetic field and temperature on spin-reorientation transitions in $\epsilon\text{-In}_0.043\text{Fe}_1.957\text{O}_3$ nanoparticles // *Low Temperature Physics*. 2015. V. 41. N 11. P. 917–921. doi: 10.1063/1.4936916

References

1. Wang J., Meng H., Wanga J.-P. Programmable spintronics logic device based on a magnetic tunnel junction element. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 10D509. doi: 10.1063/1.1857655
2. Niemier M.T., Bernstein G.H., Csaba G., Dingler A., Hu X.S., Kurtz S., Liu S., Nahas J., Porod W., Siddiq M., Varga E. Nanomagnet logic: progress toward system-level integration. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, no. 49, p. 493202. doi: 10.1088/0953-8984/23/49/493202
3. *Physical Encyclopedia*. Ed. A.M. Prohorov. Moscow, Bol'shaya Rossiiskaya Entsiklopediya, 1999, vol. 1, 704 p. (In Russian)
4. Imre A., Csaba G., Ji L., Orlov A., Bernstein G.H., Porod W. Majority logic gate for magnetic quantum-dot cellular automata. *Science*, 2006, vol. 311, no. 5758, pp. 205–208. doi: 10.1126/science.1120506
5. Patil Sh., Lyle A., Harms J., Lilja D.J., Wang J.-P. Spintronic logic gates for Spintronic data using magnetic tunnel junctions. *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Design*. Amsterdam, Netherlands, 2010, pp. 125–131. doi: 10.1109/ICCD.2010.5647611
6. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Magnetic phase transition in $\epsilon\text{-In x Fe}_2\text{-xO}_3$ nanowire. *Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 2252–2259. doi: 10.1134/S1063783413110073
7. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Spin-reorientation transition in $\epsilon\text{-In}_0.24\text{Fe}_1.76\text{O}_3$ nanowires. *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, no. 9, pp. 1795–1798. doi: 10.1134/S1063783414090091
8. Dmitriev A.I., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Anomalous magnetization dynamics near the spin-reorientation transition temperature in $\epsilon\text{-In}_0.24\text{Fe}_1.76\text{O}_3$ nanowires. *Low Temperature Physics*, 2015, vol. 41, pp. 20–24. doi: 10.1063/1.4906312
9. Dmitriev A.I., Morgunov R.B. The influence of magnetic field and temperature on spin-reorientation transitions in $\epsilon\text{-In}_0.043\text{Fe}_1.957\text{O}_3$ nanoparticles // *Low Temperature Physics*. 2015. V. 41. N 11. P. 917–921. doi: 10.1063/1.4936916

10. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Easy axis spin-flop in ϵ -phase in-doped iron (III) oxide nanowire // *Solid State Phenomena*. 2015. V. 233-234. P. 558–561. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.558
11. Ostler T.A., Barker J., Evans R.F.L., Chantrell R.W., Atxitia U., Chubykalo-Fesenko O., El Moussaoui S., Le Guyader L., Mengotti E., Heyderman L.J., Nolting F., Tsukamoto A., Itoh A., Afanasiev D., Ivanov B.A., A. Kalashnikova M., Vahaplar K., Mentink J., Kirilyuk A., Rasing Th., Kimel A.V. Ultrafast heating as a sufficient stimulus for magnetization reversal in a ferrimagnet // *Nature Communications*. 2012. V. 3. P. 666–1-6. doi: 10.1038/ncomms1666
12. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process // *IBM Journal of Research and Development*. 1961. V. 5. N 3. P. 183–191. doi: 10.1147/rd.53.0183
13. Landauer R. Fundamental physical limitations of the computational process // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1985. V. 426. N 1. P. 161–170. doi: 10.1111/j.1749-6632.1984.tb16518.x
- In0.043Fe1.957O3 nanoparticles. *Low Temperature Physics*, 2015, vol. 41, no. 11, pp. 917–921. doi: 10.1063/1.4936916
10. Dmitriev A.I., Koplak O.V., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Morgunov R.B. Easy axis spin-flop in ϵ -phase in-doped iron (III) oxide nanowire. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 233-234, pp. 558–561. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.558
11. Ostler T.A., Barker J., Evans R.F.L., Chantrell R.W., Atxitia U., Chubykalo-Fesenko O., El Moussaoui S., Le Guyader L., Mengotti E., Heyderman L.J., Nolting F., Tsukamoto A., Itoh A., Afanasiev D., Ivanov B.A., A. Kalashnikova M., Vahaplar K., Mentink J., Kirilyuk A., Rasing Th., Kimel A.V. Ultrafast heating as a sufficient stimulus for magnetization reversal in a ferrimagnet. *Nature Communications*, 2012, vol. 3, pp. 666–1-6. doi: 10.1038/ncomms1666
12. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research and Development*, 1961, vol. 5, no. 3, pp. 183–191. doi: 10.1147/rd.53.0183
13. Landauer R. Fundamental physical limitations of the computational process. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1985, vol. 426, no. 1, pp. 161–170. doi: 10.1111/j.1749-6632.1984.tb16518.x

Авторы

Дмитриев Алексей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, Российский университет транспорта, Москва, 127994, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, 142432, Российская Федерация, Alex-dmitriev2005@yandex.ru

Authors

Alexey I. Dmitriev – PhD, Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, 127994, Russian Federation; Senior scientific researcher, Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432, Russian Federation, Alex-dmitriev2005@yandex.ru