

также оказал токсическое воздействие на нормальные фибробласты кожи крысы.

Таким образом, исследование биологического влияния железо-молибденовых полиоксометаллатов на жизнеспособность клеточных культур показало отсутствие повреждающего действия кластера (1) $\text{Mo}_7\text{Fe}_{30}$ для нормальных клеток, что доказывает допустимость применения данного вида наночастиц для биомедицинских целей.

Цитотоксическая активность кластера (2) Mo_{132} делает опасным использование этого соединения в связи с возможным повреждающим действием на развивающийся или взрослый организм человека и животных.

Выводы:

1. Установлено отсутствие цитотоксичности $\text{Mo}_7\text{Fe}_{30}$ для нормальных фибробластов кожи крысы.

2. Железо-молибденовые полиоксометаллаты $\text{Mo}_7\text{Fe}_{30}$ вызывают снижение пролиферативной активности трансформированных фибробластов крысы линии К-22 и не оказывают влияния на пролиферативную активность нормальных фибробластов.

3. Кластер Mo_{132} проявил цитотоксичность по отношению к трансформированным и нормальным клеткам, в связи с чем, использование этого соединения может сопровождаться повреждающим действием на развивающийся или взрослый организм человека и животных.

4. Низкие концентрации Mo_{132} снижают пролиферативную активность нормальных фибробластов кожи крысы, в трансформированных фибробластах изменения индекса пролиферации не наблюдается.

Литература:

1. Ostroushko A.A. Study of safety of Molybdenum and Iron-Molybdenum Nanocluster Polyoxometalates Intended for Targeted Delivery of Drugs / Danilova I.G., Gette I.F. / Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology / Scientific Research Publishing, 2011, № 2. p. 557–560.

2. Ostroushko A.A. Studying of Polyoxometalates with Fullerene Structure as Potential Agents of Address Delivery of Substances / Danilova I.G., Medvedeva S.J., Gette I. F., Prokofieva A. V., Morozova M. V. / European Symposium on Biomaterials and Related Areas, April 2011, p.56.

3. Ostroushko A.A. Toxicity Studying of Polyoxometalate $\text{Mo}_7\text{Fe}_{30}$, Possibilities its Transport in Organism and Interactions with other Substances / Danilova I.G., Tonkushina M.O. / Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes / Darmstadt, Germany, 2012, p. 1098.

УДК 537.613

И.М. Изможеров¹, Б.Н. Филлипов^{1,2}, В.В. Зверев¹

**ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ В ТОНКИХ МАГНИТНЫХ
ПЛЁНКАХ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЕ**

¹⁾ Кафедра теоретической физики и прикладной математики,
Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

²⁾ ФГБУН «Институт физики металлов УрО РАН»
г. Екатеринбург, Российская Федерация

I.M.Izmozherov¹, B.N.Fillipov^{1,2}, V.V.Zverev¹

**TOPOLOGIC SOLITONS IN THIN MAGNETIC FILMS: MATHEMATICAL
MODELLING AND USAGE IN MEDICAL EQUIPMENT**

¹⁾ Department of theoretical physics and applied mathematics,
Ural Federal University,

Yekaterinburg, Russian Federation Российская Федерация

²⁾ Institute of metal physics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Контактный e-mail: ivan_izm@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрена динамика доменных стенок в тонких магнитных плёнках из пермаллоя толщиной 50нм в однородном внешнем магнитном поле. Показано, что процесс движения порождает «вихри» и «антивихри» с различными направлениями намагниченностей в центрах («корах»), которые могут быть использованы в качестве носителей информации в медицинском оборудовании различного назначения.

Annotation. The article deals with 50nm thickness permalloy magnetic film dynamics in homogeneous external field. Micromagnetic modelling of domain walls in such samples has shown, that its movement produces «vortices» and «antivortices» with different directions of magnetisations in «cores», which can be used in various medical equipment.

Ключевые слова: магнитная плёнка, доменная стенка, вихрь, солитон

Keywords: magnetic film, domain wall, vortex, soliton

В последние годы наблюдается существенный интерес к исследованию поведения намагниченности в ферромагнетиках во внешних полях[1,2]. Он связан с одной стороны с увеличением вычислительных возможностей компьютерной техники, позволяющей даже на персональных компьютерах производить за разумное время трёхмерное численное моделирование. С другой стороны – перспективой использования возникающих магнитных структур в качестве носителей в устройствах записи и обработки информации, в том числе в медицинских приборах, нуждающихся хранении и обработке больших массивов информации. Прежде всего такими являются приборы, строящие трёхмерные изображения внутренних органов с высоким

разрешением. Помимо этого, такие задачи представляют и теоретический интерес, являясь примером неравновесной системы с диссипацией энергии.

Цель исследования – изучение свойств доменных стенок в пермалловых тонких магнитных плёнках.

Материалы и методы исследования

Была сформулирована математическая модель доменной стенки, основанная на микромагнитном подходе, сформулированном Ландау и Лифшицем в 1935 году [3]. Идея данного подхода состоит в том, что характерные размеры магнитных структур, возникающих в ферромагнитных материалах значительно больше атомных размеров, но при этом значительно меньше макроскопических размеров, что позволяет рассматривать намагниченность как классическое континуальное векторное поле в трёхмерном координатном пространстве. Энергия магнетика, соответственно, рассматривается как функционал намагниченности:

$$E = \iiint_V (w_a + w_m + w_e + w_h) d^3r \quad (1)$$

$$w_m = -\frac{1}{2} \vec{H}_m \vec{M}, \quad (2)$$

$$w_e = A \left\{ \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$w_a = -K (\vec{k} \vec{M})^2 \quad (4)$$

$$w_h = -\vec{M} \vec{H} \quad (5)$$

Здесь $\vec{M}$ – намагниченность, w_m – магнитостатическая энергия или энергия размагничивания, w_e – энергия обменного взаимодействия, w_a – энергия анизотропии, w_h – зеемановская энергия взаимодействия с внешним полем $\vec{H}$, направленным вдоль оси лёгкого намагничивания (оси OZ). $\vec{H}_m$ – поле размагничивания, источником которого является «магнитный заряд». A – константа обменного взаимодействия, K – константа анизотропии. Для пермаллоя $A = 10^{-11} \text{ Дж/м}$, $K = 10^2 \text{ Дж/м}^3$.

Динамика доменных стенок описывается дифференциальными уравнениями типа Ландау-Лифшица-Гильберта:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma [\vec{M} \times \vec{H}_{\text{эфф}}] - \gamma \lambda / M_s^2 [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_{\text{эфф}}]] \quad (6)$$

$$\text{В свою очередь здесь } \vec{H}_{\text{эфф}} = -\frac{\delta E}{\delta \vec{M}} \quad (7)$$

Задача исследования состояла в численном решении уравнения (4) в области в виде параллелепипеда размерами $L_x = 400 \text{ нм}$, $L_y = 50 \text{ нм}$, $L_z = 800 \text{ нм}$ (рис. 1), моделирующей доменную стенку в тонкой пермалловой плёнке, (50 нм-толщина плёнки). Граничные условия были выбраны следующим образом: на границах $x=0$ и $x=L_x$ направление намагниченности совпадает с направлениями в соседних доменах, на границах плёнки $y=0$, $y=L_y$ намагниченность не закреплена. вдоль оси OZ (ось лёгкого

намагничивания) были выбраны периодические граничные условия, т.е. $\vec{M}|_{z=0} = \vec{M}|_{z=L_z}$.

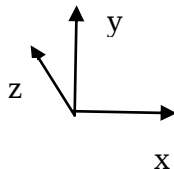
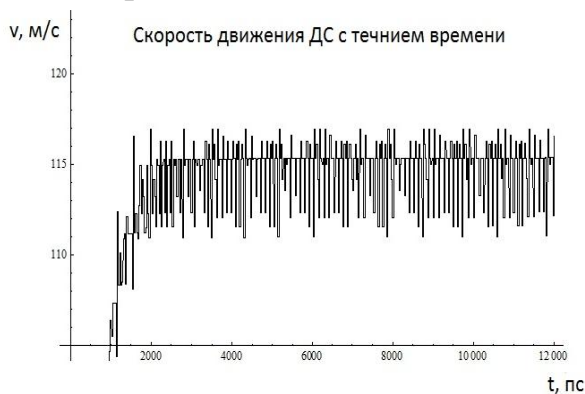


Рис.1 Намагниченность в асимметричной блоховской стенке

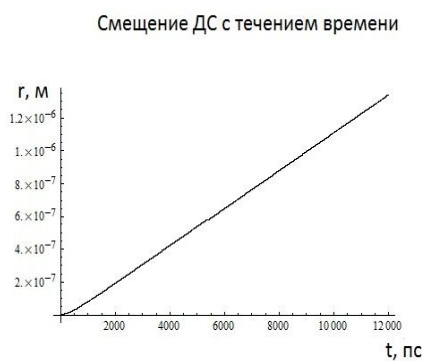
Начальная конфигурация намагниченности была взята в виде одновихревой асимметричной блоховской ДС (рис.1). Для расчётов использовался пакет микромагнитного моделирования mumax3[4], установленный на персональный компьютер. Для численного решения ДУ применялся метод Рунге-Кутты 4 порядка[5].

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс движения моделировался в течении 12нс. Было установлено, что при внешнем поле $H \approx 68 \text{ Гс}$, процесс движения начинает сопровождаться перестройкой внутренней структуры стенки с появлением топологических солитонов типа вихрь и антивихрь.

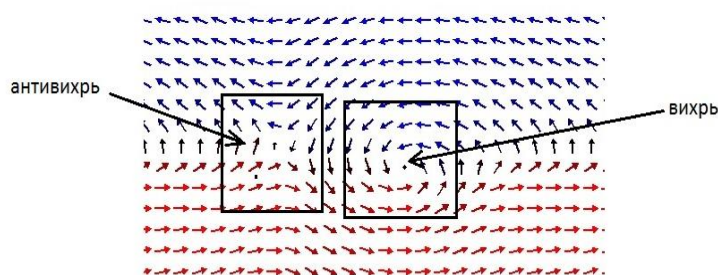


(a)



(б)

Изображение вихрей и антивихрей на поверхности плёнки $y=0$



(в)

Рис.2 Графики зависимостей скорости (а) и смещения (б) от времени, а также изображение поверхности плёнки после переходного процесса (в), внешнее магнитное поле $H=68\text{Гс}$

На рис.2 в графическом виде приведены результаты исследования. Как можно видеть на рис.2(а) изначально скорость зависит от времени нелинейным образом, что связано с изменением конфигурации намагниченности в процессе движения: асимметричная блоховская стенка переходит в конфигурацию типа кросс-тай (cross-tie), изображённую на рис.2(в). При этом на одной из поверхностей плёнки появлялись структуры типа вихрь (vortex) и антивихрь (antivortex), постепенно прорастающие и на другую поверхность в виде нитевидных структур. Намагниченности в центрах («корах») вихрей и антивихрей направлены всегда перпендикулярно поверхности плёнки в одном или другом направлении. В дальнейшем, при смещении стенки как целого, эти поверхностные структуры сохраняют устойчивость. После завершения переходного процесса, скорость осциллирует вокруг постоянного среднего значения, осцилляции связаны с прецессией компоненты намагниченности, перпендикулярной внешнему полю. Вместе с этим стенка постепенно удаляется от своего исходного положения в образце.

Наличие двух возможных направлений намагниченности в центрах вихря и антивихря может представлять интерес в контексте использования этих структур для записи и хранения информации.

Выводы:

- 1.Изучение движения ДС толщиной 50нм показало наличие динамических перестроек, интересных с тероетической точки зрения
- 2.Была показана перспективность использования пермаллоевых магнитных плёнок толщиной 50нм в запоминающих устройствах.

Литература:

- 1.Зверев В.В. Трёхмерное моделирование нерегулярной динамики топологических солитонов в движущихся границах магнитных доменов/ В.В.Зверев, Б.Н.Филлипов/ журнал «Физика твёрдого тела» том 58, вып.3/ 2016, с.473-484
2. Jourdan T. Magnetic bubbles in FePd thin films near saturation/ Jourdan T., Masseboeuf A., Lançon F., Bayle-Guillemaud P., Marty A./ JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 106, 073913, 2009
3. Ландау Л.Д. Сборник трудов, Т.1 /Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел /М. Наука 1969, с. 128 -143
4. Vansteenkiste A. The design and verification of MuMax3/ Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., et al./AIP Advances 4, 107133, 2014
5. Ильина В.А. Численные методы для физиков теоретиков, часть II/ Ильина В.А., Силаев П.К./ Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004