

05:06

Конфигурация минимальных доменов в дипольных решетках

© А.М. Шутый

Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

E-mail: shuty@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 сентября 2012 г.

Исследуются решетки магнитных диполей с малым (2–4) числом рядов. Выявлены минимальные формируемые в решетках стационарные домены и условия их возникновения. Показано, что для уничтожения домена достаточно воздействия внешним полем на один из входящих в него диполей. Проведен сравнительный анализ изменения магнитного момента системы при формировании и уничтожении данных доменов в различных решетках.

Интерес к самоорганизующимся системам приобрел особое значение с достижениями в области информационных технологий и наноструктур. Для анализа процессов самоорганизации [1,2], изучения коллективных эффектов, фазовых переходов и динамических режимов [3,4] удобными являются магнитные системы вследствие возможности эффективного управления их состоянием. Наряду с этим все большее значение приобретают стационарные структуры, формируемые в среде минимальным числом элементов. В частности, к подобным структурам относятся скирмионы, которые в магнитных кристаллах представляют собой домены, охватывающие около пятнадцати атомов [5,6]. Однако для задач сверхплотной записи и хранения информации до настоящего времени наиболее актуальным является изучение различных дипольных решеток и формируемых в них предельно малых доменов. Накопители информации, изготовленные на основе массивов из магнитных диполей, являются одними из наиболее перспективных видов запоминающих устройств. Кроме того, ансамбли однодоменных магнитных частиц являются удобными объектами для изучения коллективных эффектов, так как формируются хорошо определенным взаимодействием. Упорядоченные структуры ферромагнитных наночастиц могут быть сформированы методом нанолитографии [7] путем использования в качестве диполей состоящих из атомов железа наночастиц, которые

имеют размер около 10 nm (число атомов ~ 100 , что обеспечивает их сферическую форму) и магнитный момент $3\mu_B$ [8]. Уже сейчас разброс наночастиц по размерам при соответствующем контроле может не превышать 5% [9]. Магнитный момент наночастиц можно считать классической величиной, и основной вклад в их взаимодействие, в случае однодоменного состояния наночастиц, вносит диполь-дипольное взаимодействие [7,10].

В данной работе исследуются доменные структуры в квадратных и треугольных решетках магнитных диполей, состоящих из малого (2–4) числа рядов. Основное внимание уделяется устойчивым, но минимальным по величине конфигурациям — доменам, затрагивающим наименьшее число диполей. Рассматриваются условия возникновения и уничтожения доменов в различных решетках, а также изменения магнитного момента системы при данных процессах.

Рассматривая систему диполей, полагаем, что они связаны диполь-дипольным взаимодействием, и каждый из них способен вращаться вокруг центра симметрии, совпадающего с центром инерции. Положение диполей в решетке принимается неизменным. Тела с дипольными магнитными моментами предполагаются однородными и шарообразными [11], материал — магнитожестким. Уравнения для системы идентичных диполей в присутствии внешнего магнитного поля \mathbf{h} имеют вид [4,12]:

$$J \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} + \alpha \boldsymbol{\omega}_i = p_i \times \left(\mathbf{h} + \sum_{n \neq i} \left[\frac{3\mathbf{e}_{in}(\mathbf{p}_n \mathbf{e}_{in}) - \mathbf{p}_n}{l_{in}^3} \right] \right), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{p}_i,$$

где \mathbf{p}_i и $\boldsymbol{\omega}_i = d\boldsymbol{\varphi}_i/dt$ — дипольный магнитный момент и угловая скорость i -го диполя ($\boldsymbol{\varphi}_{ij}$ — угол поворота диполя вокруг оси $j = x, y, z$ декартовой системы координат), J — момент инерции, γ — параметр диссипации; $\mathbf{e}_{in} = \mathbf{r}_{in}/r_{in}$ — единичные вектора вдоль направления, \mathbf{r}_{in} — вектор между расположениями i -го и n -го диполей, $l_{in} = r_{in}/a$ — расстояние, нормированное на характерный параметр a конфигурации системы (в рассматриваемых решетках a — расстояние между рядами диполей и между соседними диполями в каждом ряду). Далее переходим к безразмерным параметрам [12]:

$$\rho_{ij} = \frac{p_{ij}}{p}, \quad \beta = \frac{\alpha}{vJ}, \quad \boldsymbol{\omega}_i = \frac{d\boldsymbol{\varphi}_i}{d\tau}, \quad (2)$$

где $\tau = vt$ ($v = \sqrt{p^2/Ja^3}$). Компоненты внешнего поля в этом случае имеют вид: $f_j = h_j p / (v^2 J)$. При численном анализе для уменьшения времени счета учитывается связь каждого диполя только с соседними диполями и диполями, ближайшими к последним (т. е. при неограниченной решетке учитывается связь каждого диполя с 24 диполями).

Принимая в качестве исходной однородную равновесную конфигурацию, т. е. когда магнитные моменты диполей направлены вдоль решеток (как правило, противоположно в соседних рядах), рассмотрим формирование минимальных по величине доменов. При этом возмущение исходной конфигурации осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, воздействующего на отдельные диполи. На рис. 1 показаны наименьшие стационарные домены, возбужденные в квадратных (A, B, C) и треугольных (D, E, F) решетках, отличающихся от первых сдвигом соседних рядов на полпериода. Домены возбуждались статическим полем, воздействующим на диполи, магнитные моменты которых на рисунке отмечены жирными стрелками; так как полагается, что ряды ориентированы вдоль оси y , поле также направлено вдоль y ,

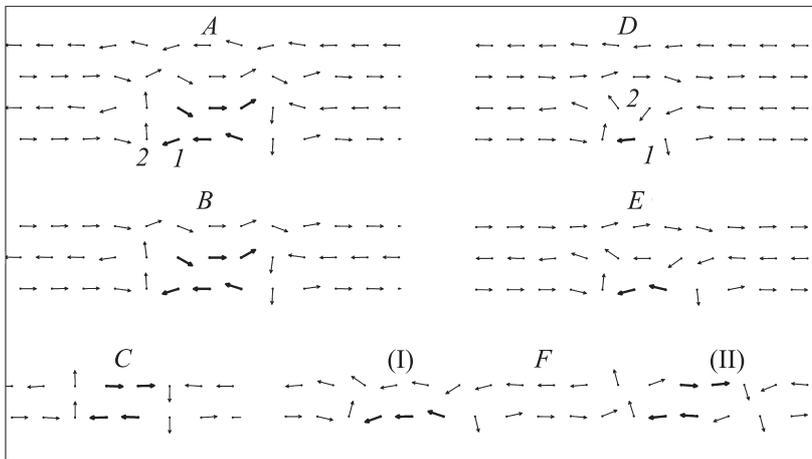


Рис. 1. Минимальные стационарные доменные конфигурации. Домены возбуждались статическим магнитным полем с $|f_x| = |f_y| = 5$, действующим на диполи, магнитные моменты которых отмечены жирными стрелками. (Цифрами 1 и 2 в решетках A и D отмечены диполи, на которые при построении рис. 3 воздействовало внешнее поле для уничтожения доменов).

противоположно исходной ориентации соответствующих магнитных моментов. В частности, для структуры A поле, действующее на три диполя внутреннего ряда, ориентировано в направлении y , а действующее на три диполя внешнего ряда — в направлении $-y$. Во всех случаях величина поля $|f| = |f_y| = 5$.

Представленные домены устанавливаются после выключения внешнего поля и являются устойчивыми. Однако выключение поля слабо влияет на изменение конфигурации; кроме того, во все домены входят диполи с ориентацией, близкой к противоположной относительно исходной. Последнее дало основание полагать, что действие полем на минимальное число диполей решетки приводит к формированию минимальных по величине доменов. Данный вывод подтвердился в дополнительных исследованиях: при возбуждении меньшего числа диполей, или в случае поля другой ориентации, возникающие конфигурации оказываются неустойчивыми и после выключения поля разрушаются; при воздействии же на большее число диполей возникают подобные, но большие по величине домены.

Видно, что для формирования минимального устойчивого домена в случае квадратных решеток A и B требуется возбудить (ориентировать внешним полем в направлении, противоположном исходному) шесть диполей — по три в соседних рядах. В случае же трехрядной треугольной решетки E для формирования устойчивого домена достаточно воздействовать на два диполя крайнего ряда. И, наконец, формирование минимального домена в четырехрядной треугольной решетке осуществляется возбуждением только одного диполя крайнего ряда. В двухрядной квадратной решетке C устойчивый домен, представляющий собой одну из наиболее компактных конфигураций (охватывающую 8 диполей), формируется возбуждением четырех диполей — по два в каждом ряду. В случае двухрядной треугольной решетки (F) имеют место две устойчивые доменные конфигурации (I и II) — первая формируется воздействием на три диполя, вторая — воздействием на два диполя каждого ряда; при этом данные домены оказываются больше, чем домены в квадратной двухрядной решетке (охватывают до 12 диполей).

Для анализа использовался метод Рунге–Кутты 4-го порядка при отслеживании выхода конфигураций на стационарный режим. Введенное приближение связи каждого диполя с ближайшими и следующими за ними соседями не приводит к заметному изменению равновесных доменов. Расчеты показали, что отбрасываемые члены могут изменить

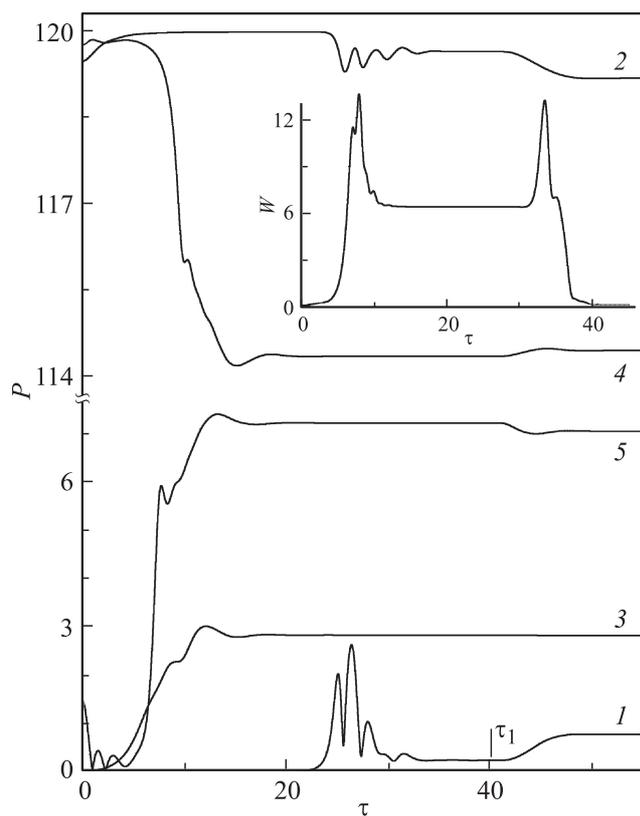


Рис. 2. Зависимость от времени суммарного магнитного момента решеток A , B , D , E , F — для домена (I) (кривые 1–5) при формировании минимальных устойчивых доменов. На вставке: зависимость от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия W при формировании домена в решетку E , а также при последующем его уничтожении (действуя полем на диполь домена).

менее чем на 1 градус ориентацию моментов диполей, входящих в домен, и до нескольких (до 5–7) градусов моментов диполей, прилегающих к домену, не меняя саму конфигурацию.

На рис. 2 дана зависимость от времени суммарного магнитного момента $\mathbf{P} = \sum \rho_i$ решеток A , B , D , E , F для домена (I) (кривые 1–5),

при формировании показанных на рис. 1 доменов. На рисунке также отмечено τ_1 — время выключения внешнего поля. При численном счете брались решетки со 120 диполями в ряду, что объясняет значение \mathbf{P} трехрядной системы, где магнитные моменты одного ряда остаются некомпенсированными. Видно, что в трех- и четырехрядных треугольных решетках время формирования доменов меньше, чем в соответствующих квадратных решетках. При этом с формированием домена полный магнитный момент четырехрядной решетки увеличивается, а магнитный момент трехрядной решетки — уменьшается. В случае двухрядных систем домен (I) увеличивает магнитный момент треугольной решетки F , домен же (II) оставляет магнитный момент близким к нулю. Нулевым остается при формировании домена также магнитный момент квадратной решетки C . На вставке дана зависимость от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия системы при формировании и последующем уничтожении домена трехрядной решетки E (за нулевой уровень принята энергия однородного состояния решетки). Воздействие внешнего поля приводит к росту энергии системы; далее, после формирования устойчивого домена энергия падает, не достигая исходного уровня (выключение внешнего поля слабо влияет на установившуюся конфигурацию); при разрушении домена энергия также вначале резко возрастает. В случае формирования и уничтожения других доменов соответствующие зависимости аналогичны.

Для уничтожения домена и возвращения решетки к исходному однородному состоянию достаточно воздействия внешнего магнитного поля на один, входящий в домен диполь. На рис. 3 приведена зависимость от времени суммарного момента в случае разрушения домена в решетках A и D (a и b) при воздействии поля на различные диполи: кривые 1 и 2 отвечают воздействию поля на диполи, отмеченные соответствующими цифрами на рис. 1 ($f_y = 5$ для рис. 3, a и кривой 1 рис. 3, b и $f_y = -5$ для кривой 2 рис. 3, b). Видно, что при воздействии поля на различные диполи время разрушения доменов оказывается различным. В треугольных трех- и четырехрядных решетках разрушение доменов (как и формирование) протекает быстрее, чем в квадратных решетках; однако время разрушения домена в двухрядной квадратной решетке C является малым $\tau \approx 5$.

Таким образом, выявлены конфигурации минимальных стационарных доменов, возбуждаемых в квадратных и треугольных решетках, состоящих из 2–4 рядов диполей; получено также время их формирования и изменение в данном процессе суммарного магнитного момента

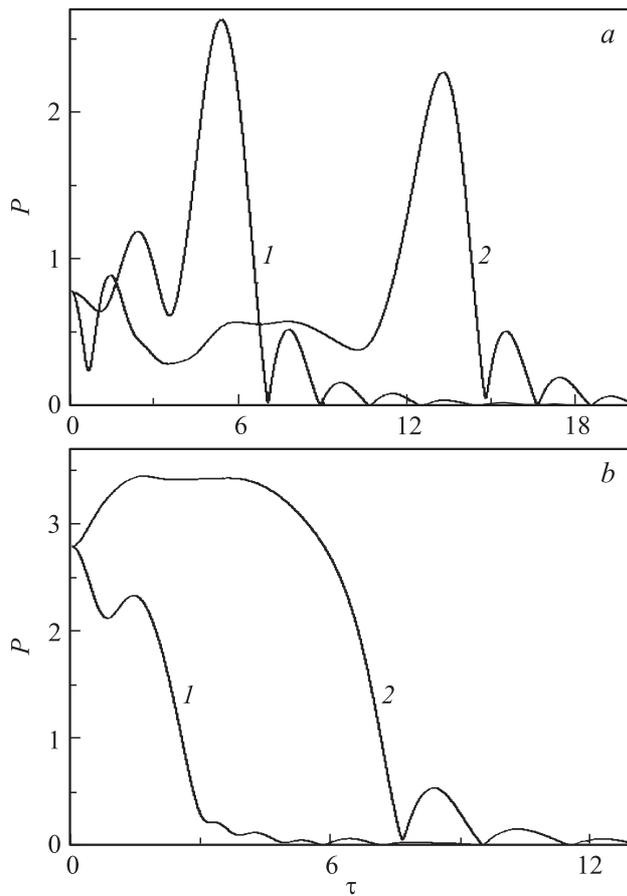


Рис. 3. Зависимость от времени магнитного момента системы при разрушении доменов в решетках A и D (a и b соответственно) при воздействии поля на диполи, отмеченные на рис. 1 цифрами 1 и 2 (кривые 1 и 2).

системы. Показано, что в случае трех- и четырехрядных систем как формирование, так и уничтожение доменов быстрее протекает в треугольных решетках. В случае же двухрядных систем время формирования и уничтожения доменов минимально в квадратных решетках, причем

данные домены являются наиболее компактными. Для формирования минимальных стационарных доменов в различных решетках требуется воздействие внешнего магнитного поля на разное число диполей: для треугольных решеток это число ниже; в частности, для формирования домена в четырехрядной треугольной решетке достаточно воздействия поля только на один диполь, тогда как в случае квадратных решеток требуется воздействие на шесть диполей. Для уничтожения сформированного домена и возвращения решетки к исходному состоянию достаточно воздействия магнитного поля на один из входящих в домен диполь; при этом время уничтожения домена зависит от того, на какой из диполей действует внешнее поле.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и образованию в рамках федеральных целевых программ „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы“ и „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы“, соглашение № 14.В37.21.0772.

Список литературы

- [1] Филиппов Б.Н., Корзуни Л.Г. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. В. 372–387.
- [2] Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х., Пашко А.Г. // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 10. С. 1806–1812.
- [3] Семенов Д.И., Шутый А.М. // УФН. 2007. Т. 177. С. 831–857.
- [4] Шутый А.М. // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. В. 5. С. 1009–1010.
- [5] Пятаков А. // ПерсТ. 2010. Т. 17. В. 13/14. С. 4.
- [6] Seki S., Yu X.Z., Ishiwata S., Tokura Y. // Science. 2012. V. 336. N 6078. P. 198–201.
- [7] Гусев С.А., Ноздрин Ю.Н., Сапожников М.В., Фраерман А.А. // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 331–333.
- [8] Becker I.A., Chatelain A., Heer W.A. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N 24. P. 4067–4070.
- [9] Губин С.П., Кокиаров Ю.А. // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 11. P. 1287–1304.
- [10] Каретникова И.Р., Нефедов И.М., Сапожников М.В., Фраерман А.А., Шершевский И.А. // ФТТ. 2001. Т. 43. В. 11. С. 2030–2034.
- [11] Губин С.П., Кокиаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [12] Шутый А.М. // ЖТФ. 2010. Т. 137. В. 2. С. 277–286.