

Предельно малые домены в решетке магнитных диполей

© А.М. Шутый

Ульяновский государственный университет,
432970 Ульяновск, Россия
e-mail: shuty@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 сентября 2012 г.)

Исследованы решетки магнитных диполей с 1–4 числом рядов. На основе численного анализа выявлены минимальные формируемые в решетках стационарные домены, получены необходимые условия возникновения и уничтожения данных доменов, рассмотрено изменение при их формировании магнитного момента решеток. Показано, что для уничтожения домена достаточно воздействия внешнего поля на один из входящих в него диполей. Выявлены решетки, в которых возникает распространяющийся на всю систему ориентационный фазовый переход при возмущении нескольких диполей.

Введение

Свойства различных дипольных систем отличны как от свойств отдельных составляющих их частиц, так и от свойств объемного вещества [1,2], благодаря чему интерес к подобным системам всегда был высоким, но особое значение данные объекты приобрели в связи с достижениями в области информационных технологий и наноструктур. Для анализа процессов самоорганизации [3,4], изучения коллективных эффектов, фазовых переходов и динамических режимов [5,6] удобными являются магнитные системы вследствие возможности эффективного управления их состоянием. При этом 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 [7,8]. Однако для задач сверхплотной записи и хранения информации актуальным является также изучение различных дипольных решеток с доменами, обусловленными диполь-дипольным взаимодействием. Упорядоченные структуры ферромагнитных наночастиц могут быть сформированы методом нанолитографии [9], используя в качестве диполей состоящие из атомов железа наночастицы, которые имеют размер около 10 nm (число атомов ~ 100 , что обеспечивает их сферическую форму) и магнитный момент $3\mu_B$ [10]. Уже сейчас разброс наночастиц по размерам при соответствующем контроле может не превышать 5% [11]. Магнитный момент наночастиц можно считать классической величиной, и основной вклад в их взаимодействие, в случае однодоменного состояния наночастиц, вносит дипольное взаимодействие [9,12].

В настоящей работе исследуются доменные структуры в решетках магнитных диполей, состоящих из малого числа рядов. Основное внимание уделяется формированию устойчивых, но минимальных по величине структур — затрагивающих наименьшее число диполей (что весьма важно с прикладной точки зрения для выявления предельных значений плотности информа-

ции). Рассматриваются изменения суммарного магнитного момента системы при возникновении доменов и условия их уничтожения. Описывается также процесс фазового перехода, переводящий решетку диполей из одной ориентационной конфигурации в другую.

Основные уравнения

Рассматривая систему диполей, полагаем, что каждый из них связан с другими посредством диполь-дипольного взаимодействия и способен вращаться вокруг центра симметрии, совпадающего с центром инерции диполя. Положение диполей в решетке принимается неизменным. Тела с дипольными магнитными моментами предполагаются однородными и шарообразными [13], материал — магнитожестким. Динамические уравнения для связанных диполей имеют вид [6,14]

$$J_j \frac{d\omega_i}{dt} + \alpha_i \omega_i = \mathbf{p}_i \times \mathbf{H}_i, \quad \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \omega_i \times \mathbf{p}_i, \quad (1)$$

где \mathbf{p}_i и $\omega_i = d\varphi_i/dt$ — дипольный магнитный момент и угловая скорость i -го диполя (φ_{ij} — угол поворота соответствующего диполя вокруг оси $j = x, y, z$ декартовой системы координат), J_i — момент инерции, α_i — параметр диссипации, в отсутствие внешнего поля магнитное поле, создаваемое в месте расположения i -го диполя, остальными диполями определяется выражением

$$\mathbf{H}_i = \sum_{n \neq i} \left[\frac{3\mathbf{e}_{in}(\mathbf{p}_n \mathbf{e}_{in}) - \mathbf{p}_n}{l_{in}^3} \right],$$

где $\mathbf{e}_{in} = \mathbf{r}_{in}/r_{in}$ — единичные векторы вдоль направления, \mathbf{r}_{in} — вектор между положениями i -го и n -го диполей, $l_{in} = r_{in}/a$ — расстояние, нормированное на характерный параметр конфигурации системы a (в рассматриваемой системе a — расстояние между рядами диполей в решетке и между соседними диполями в каждом ряду). При наличии внешнего статического магнитного поля \mathbf{h} оно добавляется к полю (2). Составляющие

решетку магнитные диполи принимаются идентичными: $|\mathbf{p}_i| = p$, $J_i = J$, $\alpha_i = \alpha$. Далее удобно сделать переход к безразмерным параметрам [14]

$$\rho_{ij} = p_{ij}/p, \quad \beta = \alpha/(vJ), \quad \omega_i = d\phi_i/d\tau, \quad (2)$$

где дифференцирование проводится по безразмерному времени $\tau = vt$ ($v = \sqrt{p^2/Ja^3}$). Компоненты внешнего поля в этом случае преобразуются к виду $f_j = h_j p/(v^2 J)$. При численном анализе для уменьшения времени счета учитывается связь каждого диполя только с соседями и ближайшими к ним диполями (т.е. при неограниченной решетке связь диполя с 24 диполями).

Возбуждаемые в решетках домены

Выстраивание дипольных моментов в решетке диполей при исходной случайной их ориентации приводит к возникновению различных по величине доменов. В доменах реализуются две ориентационные конфигурации цепочки сонаправленных диполей, когда в соседних цепочках диполи имеют противоположное направление, и „седлообразная“ конфигурация, в которой диполи, лежащие на одной диагонали квадратной ячейки, направлены навстречу друг к другу, а лежащие на другой диагонали направлены в противоположную друг от друга сторону.

В случае длинных узких дипольных решеток — решеток с небольшим числом рядов (2–6 рядов) имеет место, главным образом, первая из названных конфигурация. Однако и в этом случае решетки разбиваются на домены с противоположно направленными в соседних доменах цепочками диполей; между доменами возникают границы — узкие области с ориентацией дипольных моментов, близкой к „седлообразной“. После приложения к данным решеткам внешнего магнитного поля вдоль дипольных цепочек, приводящего к выстраиванию по нему магнитных моментов, и последующего выключения поля, формируется однородная (однодоменная) конфигурация с противоположно направленными цепочками диполей.

Далее, принимая в качестве исходной однородную конфигурацию дипольных моментов в решетках с малым числом рядов (включая структуру, состоящую из одного ряда диполей), рассмотрим формирование в решетках минимальных по величине ориентационных доменов. При этом будем полагать, что возмущение исходной конфигурации будет осуществляться с помощью внешнего магнитного поля, действующего на отдельные диполи решетки. На рис. 1 показаны наименьшие стабильные доменные конфигурации, возбужденные в структурах с 1–4 рядами диполей (в расчетах принято, что ряды состоят из 50 диполей, и положены свободные граничные условия). Домены возбуждались статическим магнитным полем, действующим на диполи, магнитные моменты которых на рисунке отмечены жирными стрелками. Полагается, что ряды решеток ориентированы вдоль

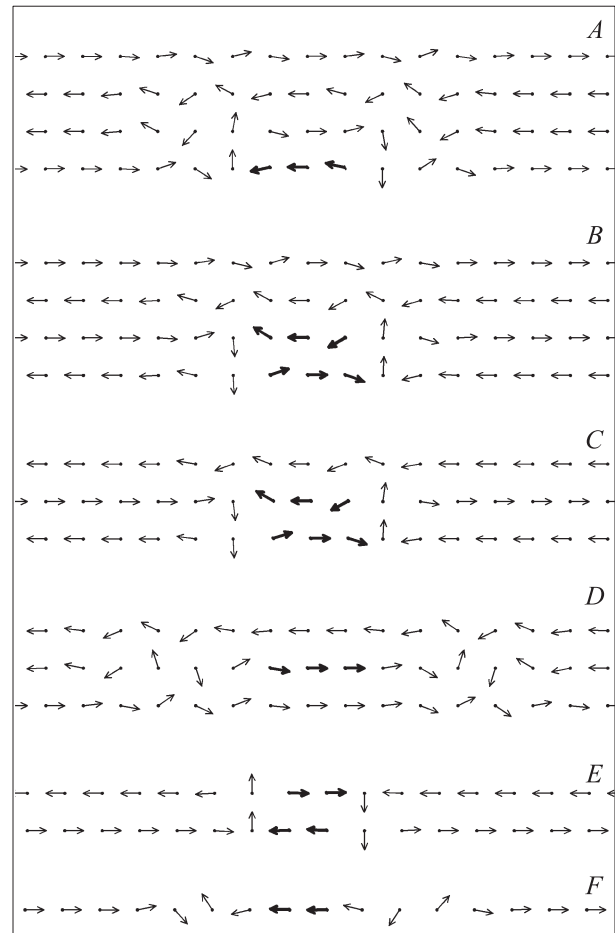


Рис. 1. Наименьшие стационарные доменные конфигурации, сформированные в рассматриваемых структурах. Домены возбуждались статическим магнитным полем с $|f| = |f_y| = 5$, действующим на диполи, магнитные моменты которых отмечены жирными стрелками.

оси u . При этом статическое поле также ориентировано вдоль данной оси в направлении, противоположном исходному направлению магнитных моментов тех диполей, на которые поле воздействует. В частности, для структуры *A*, состоящей из четырех рядов, крайние из которых имеют магнитные моменты, ориентированные в положительном направлении оси u , а внутренние ряды — в направлении $-u$, возмущающее магнитное поле, действующее на три диполя (выделенных жирной линией), ориентировано в направлении $-u$. Для структуры *B* с чередующейся ориентацией магнитных моментов в рядах магнитное поле, действующее на три диполя внутреннего ряда, также ориентировано в направлении $-u$, а действующее на три диполя крайнего ряда — в направлении u . Во всех случаях модуль внешнего поля был равен $|f| = |f_y| = 5$. Показанные на рисунке конфигурации доменов устанавливаются уже после выключения внешнего магнитного поля и являются стационарными.

Следует подчеркнуть, что при возбуждении меньшего числа диполей (например, при возбуждении только двух диполей решетки *A* или менее шести диполей решетки *B*) возникающие ориентационные конфигурации оказываются неустойчивыми и разрушаются после выключения внешнего магнитного поля — в результате устанавливается исходное однородное (однодоменное) состояние решетки. На данном основании делается вывод о том, что рассматриваемые доменные структуры являются минимальными, т.е. охватывающими наименьшее число диполей.

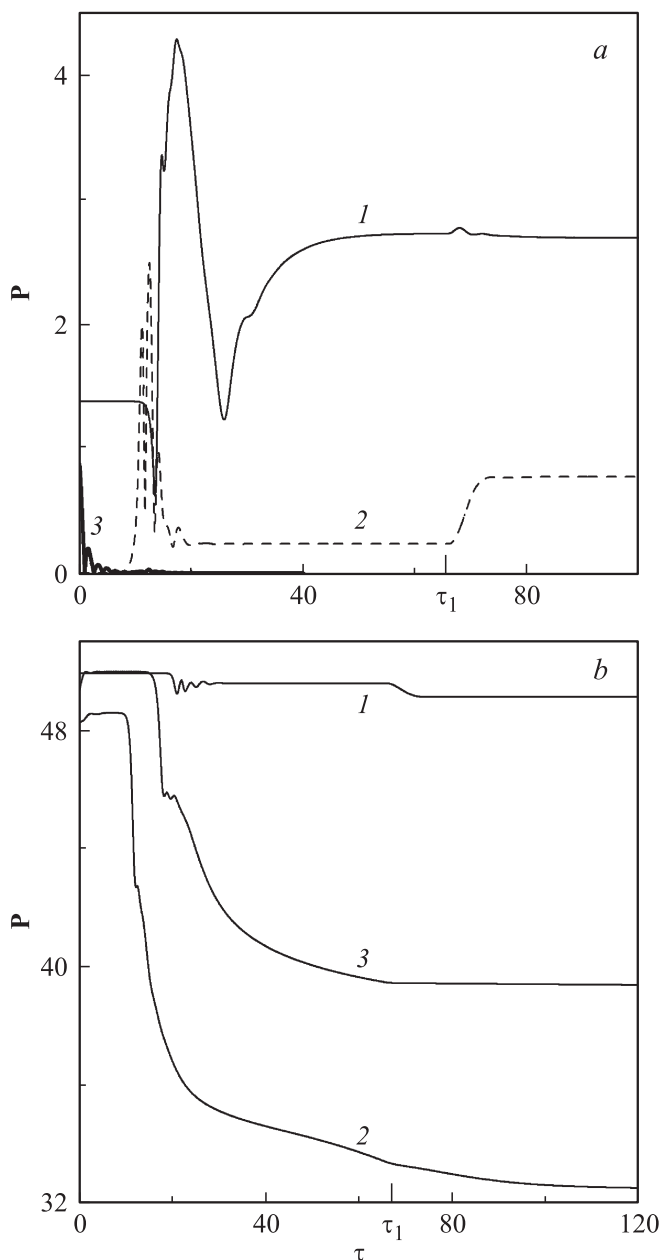


Рис. 2. Зависимость от времени суммарного магнитного момента решеток *A*, *B* и *E* (*a*, кривые 1–3), *C*, *D* и *F* (*b*, кривые 1–3) при формировании минимальных устойчивых доменов; τ_1 — время выключения внешнего магнитного поля.

Из приведенного рисунка видно, что для формирования минимального устойчивого домена требуется возбудить (ориентировать внешним полем в направлении, противоположном исходному) шесть диполей в случае структур *B* и *C*, три диполя в случае структур *A* и *D*, четыре диполя структуры *E*, состоящей из двух рядов, и два диполя однорядной структуры *F*. Заметим, что возбуждение трех диполей внутреннего ряда решетки *A* или трех диполей решетки *D* (случаи, отсутствующие на рисунке) не приводит к формированию устойчивых доменов — после выключения внешнего поля устанавливается исходная ориентационная конфигурация решеток. Из рисунка также видно, что в формировании минимального домена приблизительно участвует отрезок решетки *A*, содержащий 36 диполей (9 диполей каждого ряда). В случае решетки *D* в сравнении с другими рассмотренными структурами, формируемый домен распространяется на наибольший участок решетки. Большая область структуры охватывается минимальным доменом также в случае *F* — одного ряда диполей (несмотря на то, что для его формирования требуется воздействие только на два диполя). В случае же двурядной решетки устойчивый домен оказывается наименьшим и охватывает только 8 диполей.

На рис. 2 показана зависимость от времени суммарного магнитного момента $\mathbf{P} = \sum \rho_i$ решеток *A*, *B* и *E* (*a*, кривые 1–3), *C*, *D* и *F* (*b*, кривые 1–3) при формировании минимальных устойчивых доменов. На рисунке также отмечено τ_1 — время выключения внешнего магнитного поля. Видно, что в случае структуры *A* выключение поля мало меняет установившуюся конфигурацию; в случае же структуры *B* конфигурация меняется, приходя к устойчивому состоянию. Формирование домена в двурядной решетке *E* занимает минимальное время (что делает именно эту структуру наиболее перспективной с точки зрения заданного формирования устойчивых минимальных доменов). Исходный суммарный магнитный момент решеток *C*, *D* и *F* (*b*) близок к значению $P = 50$ (так как в каждом ряде структуры находится 50 диполей, и магнитные моменты одного ряда оказываются некомпенсированными); при формировании доменов магнитный момент данных систем уменьшается. Наиболее заметное уменьшение P при формировании доменов имеет место в случае решетки *D*.

Подавление доменов

Подавление сформированных доменов и возвращение решетки к исходному однородному состоянию может быть осуществлено воздействием внешнего магнитного поля как на несколько диполей (например, полем, противоположным по направлению полю, формирующему домен), так и воздействием поля только на один из диполей. На рис. 3 показано несколько последовательных фаз уничтожения минимального домена решетки *A* с помощью поля $f_y = 5$, воздействующего на диполь,

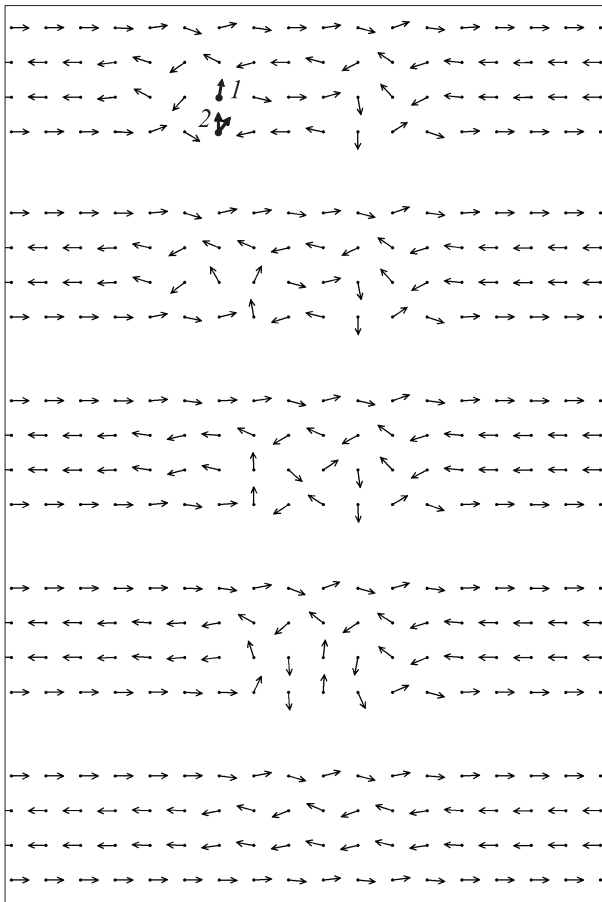


Рис. 3. Фазы уничтожения минимального домена решетки A ; поле с $f_y = 5$ действует на выделенный диполь: 1 — исходная его ориентация, 2 — его последующая ориентация (ориентация остальных диполей при этом не изменилась).

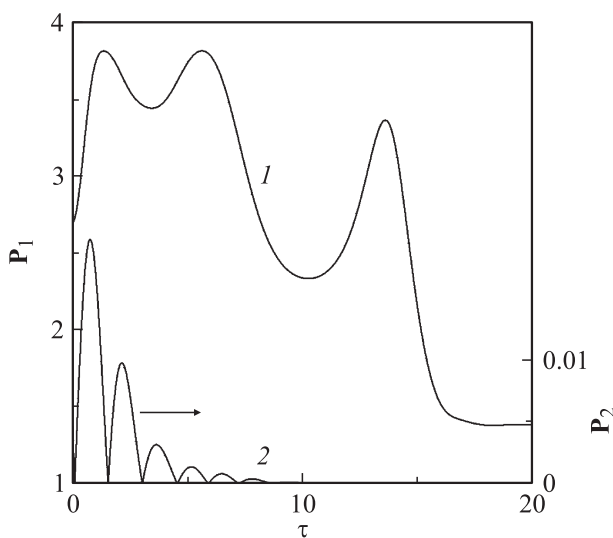


Рис. 4. Зависимость от времени суммарного магнитного момента системы при разрушении минимального домена для решетки A (P_1 — кривая 1) и для двурядной решетки E (P_2 — кривая 2).

выделенный в верхней части рисунка. Далее происходит постепенное разрушение всего домена; внешнее поле в течение представленного процесса продолжало действовать на указанный диполь (однако на определенном этапе его можно отключить). Разрушение домена реализуется также при воздействии поля и на ряд других входящих в домен диполей.

На рис. 4 приведена зависимость от времени суммарного момента системы при разрушении минимального домена для вышеописанного случая, т.е. для решетки A (P_1 — кривая 1), и для двурядной решетки E (P_2 — кривая 2) при разрушении соответствующего минимального домена в результате аналогичного воздействия внешнего поля на один из диполей решетки (на диполь с магнитным моментом, направленным перпендикулярно структуре, т.е. вдоль оси z — см. рис. 1). Из рисунка видно, что разрушение доменов сопровождается затухающими колебаниями магнитного момента системы (в наибольшей степени это относится к решетке E). Время разрушения рассмотренных доменов $\tau \approx 10-15$, которое можно сократить, воздействуя внешним полем сразу на несколько диполей домена.

Фазовый переход в решетке диполей

Возбуждение решетки D путем воздействия магнитного поля на три „внутренних“ диполя приводит к возникновению двух распространяющихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью ориентационных волн, каждая из которых локализована в области 9–12 диполей. На рис. 5 приведено несколько фаз данного процесса при начальном возбуждении полем с $f_y = -5$ диполей, выделенных жирной стрелкой. Возникшее ориентационное возмущение разбивается на две симметрично расходящиеся области. При этом меж-

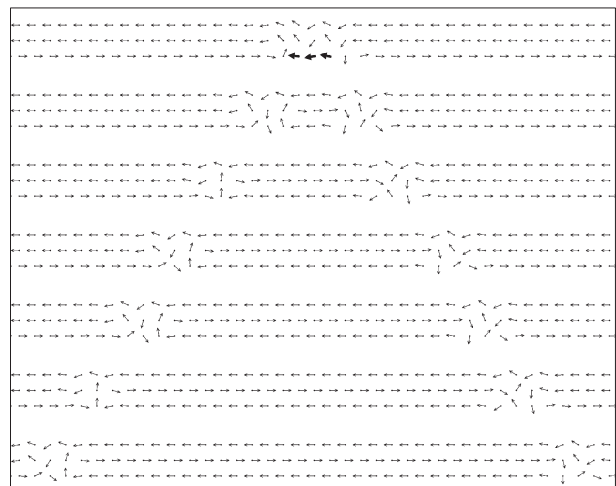


Рис. 5. Фазы продвижения фронта ориентационного фазового перехода, перестраивающего конфигурацию трехрядной решетки D в C ; поле с $f_y = -5$ действует на диполи, выделенные жирной стрелкой.

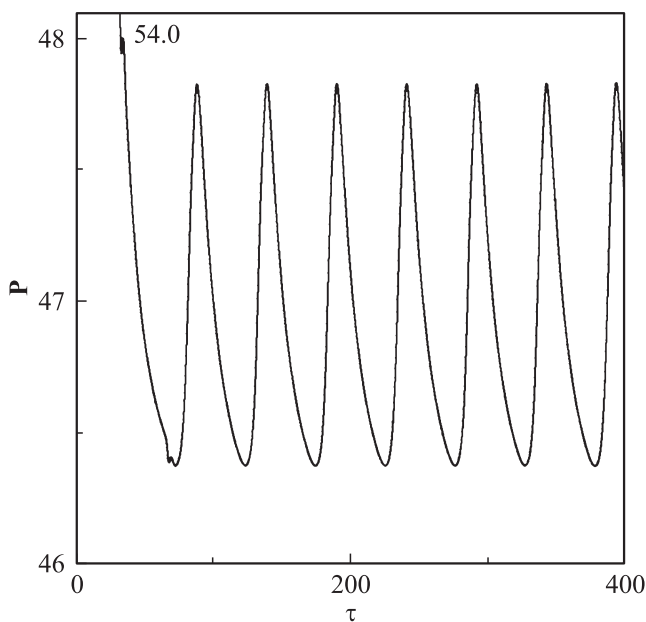


Рис. 6. Изменение во времени суммарного магнитного момента решетки при продвижении фронта фазового перехода, перестраивающего конфигурацию D в C .

ду данными областями устанавливается конфигурация трехслойной решетки C (рис. 1), что говорит о ее большей устойчивости. Данный процесс следует рассматривать как продвижение в двух направлениях фронта ориентационного фазового перехода, перестраивающего конфигурацию D в C . На рис. 6 показано изменение во времени суммарного магнитного момента при описанном процессе. Видно, что с продвижением фронта ориентационного фазового перехода происходит регулярное изменение величины P с амплитудой, близкой к 1.5.

Заключение

Таким образом, проведенным анализом выявлены конфигурации минимальных — охватывающих наименьшее число диполей — стационарных доменов, возбуждаемых в различных дипольных решетках, состоящих из 1–4 рядов диполей; выявлены также некоторые особенности доменов, в частности, время их формирования и изменение при данном процессе суммарного магнитного момента системы. Показано, что возбуждение таких доменов может осуществляться изменением ориентации магнитных моментов нескольких диполей (от 3 до 6 — в зависимости от решетки) с помощью внешнего магнитного поля. Для уничтожения ориентационного домена и возвращения решетки к исходному состоянию достаточно воздействия магнитного поля только на один входящий в домен диполь. Обнаружено также, что действие магнитного поля на несколько диполей трехрядной решетки, два соседних ряда которой имеют сонаправленную ориентацию дипольных моментов, при-

водит к распространяющемуся на всю решетку фазовому переходу в другую ориентационную конфигурацию. Показано, что наиболее компактные стационарные домены формируются в двухслойных дипольных решетках; время формирования и уничтожения доменов в таких решетках также минимально.

Список литературы

- [1] Смирнов Б.М. // УФН. 2007. Т. 177. Вып. 4., С. 366–373.
- [2] Макаров Г.Н. // УФН. 2008. Т. 178. Вып. 4. С. 337–376.
- [3] Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 2. С. 372–387.
- [4] Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х., Пашко А.Г. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 10. С. 1806–1812.
- [5] Семенов Д.И., Шутый А.М. // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831–857.
- [6] Шутый А.М. // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. Вып. 5. С. 1009–1010.
- [7] Пятаков А. // ПерсТ. 2010. Т. 17. Вып. 13/14. С. 4.
- [8] Seki S., Yu X.Z., Ishiwata S., Tokura Y. // Science. 2012. Vol. 336. N 6078. P. 198–201.
- [9] Гусев С.А., Ноздрин Ю.Н., Сапожников М.В., Фраерман А.А. // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 331–333.
- [10] Becker I.A., Chatelain A., Heer W.A. // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. N 24. P. 4067–4070.
- [11] Губин С.П., Кокиаров Ю.А. // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 11. P. 1287–1304.
- [12] Каретникова И.Р., Нефедов И.М., Сапожников М.В., Фраерман А.А., Шерешевский И.А. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 2030–2034.
- [13] Губин С.П., Кокиаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [14] Шутый А.М. // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. Вып. 2. С. 277–286.