

05,11

Равновесные конфигурации и фазовые переходы в дипольных решетках

© А.М. Шутый

Ульяновский государственный университет,
Ульяновск, Россия

E-mail: shuty@mail.ru

(Поступила в Редакцию 15 мая 2013 г.)

Исследуются двумерные квадратные и гексагональные решетки магнитных диполей с числом рядов 1–4. На основе численного анализа выявлены равновесные устойчивые доменные конфигурации, включающие минимальное число диполей решетки; получены условия возникновения и уничтожения доменов, а также установлено связанное с ними изменение магнитного момента решетки и энергии дипольного взаимодействия. Исследуются условия реализации фазовых переходов, меняющих конфигурацию решеток, при этом выявлены условия реализации однонаправленного распространения фронта фазового перехода. Проводится сравнительный анализ различных квадратных и гексагональных решеток с точки зрения особенностей формируемых доменов и имеющих место ориентационных фазовых переходов.

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 гг.“ и „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.“, соглашение № 14.В37.21.0772.

1. Введение

Исследования самоорганизующихся систем, в том числе ансамблей наночастиц, приобрели особое значение в связи 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 ввиду возможности эффективного управления их состоянием. Наряду с этим все большее значение приобретают стационарные структуры, формируемые в среде с 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 сих пор наиболее актуальным является изучение различных дипольных решеток и формируемых в них предельно малых доменов. Накопители информации, изготовленные на основе массивов из магнитных диполей, являются одним 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. В последние годы ведется систематическое изучение и внедрение в практику создаваемых нанотехнологиями [7] магнитных сверхструктур. Среди них особый интерес представляют двумерные сверхструктуры, в частности в виде квадратных решеток магнитных наночастиц с формой, близкой к круговой, на немагнитной подложке; такие частицы часто называют магнитными точ-

ками [8]. Упорядоченные структуры ферромагнитных наночастиц могут быть сформированы методом нанолитографии [9] при использовании 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 $3\mu_B$ [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 диполь-дипольное взаимодействие [9,12].

В настоящей работе исследуются доменные структуры и фазовые переходы в квадратных и гексагональных решетках магнитных диполей, состоящих из малого (1–4) числа рядов. Основное внимание уделяется устойчивым, но минимальным по величине конфигурациям — доменам, формируемым наименьшим числом диполей. Рассматриваются условия возникновения и уничтожения доменов в разных решетках, скорость данных процессов, а также связанные с ними изменения суммарного магнитного момента систем и энергии связи. Для некоторых доменных конфигураций выявляется максимальная плотность их формирования в решетке. Наряду с доменами исследуются фазовые переходы, меняющие взаимную ориентацию дипольных моментов рядов решетки. При этом рассматриваются случаи симметричного распространения в двух направлениях вдоль решетки фронта фазового перехода, а также условия реализации однонаправленного его распространения. По указанным вопросам проводится сравнение квадратных и гексагональных дипольных решеток.

2. Исходные 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 — магнитоэластиком. Динамические уравнения для связанных диполей при этом имеют вид [14,15]

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

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

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

$$\mathbf{H}_i = \sum_{n \neq i} \left[\frac{3\mathbf{e}_{in}(\mathbf{p}_n \mathbf{e}_{in}) - \mathbf{p}_n}{l_{in}^3} \right], \quad (2)$$

где $\mathbf{e}_{in} = \mathbf{r}_{in}/r_{in}$ — единичные векторы вдоль направления, \mathbf{r}_{in} — вектор между расположениями i -го и n -го диполей, $l_{in} = r_{in}/a$ — расстояние, нормированное на характерный параметр конфигурации системы a . В рассматриваемых системах a — расстояние между ближайшими диполями, располагающимися в вершинах квадрата в квадратных решетках и в вершинах правильного треугольника в гексагональных решетках. При наличии внешнего магнитного поля h оно добавляется к полю (2). Составляющие решетку магнитные диполи принимаются идентичными: $|\mathbf{p}_i| = p$, $J_i = J$, $\alpha_i = \alpha$. Далее удобно перейти к безразмерным параметрам [14]

$$\rho_{ij} = p_{ij}/p, \quad \beta = \alpha/(vJ), \quad \omega_i = d\varphi_i/d\tau, \quad (3)$$

где дифференцирование проводится по безразмерному времени $\tau = vt$ ($v = \sqrt{p^2/Ja^3}$). Компоненты внешнего поля в этом случае преобразуются к виду $f_j = h_j p/(v^2 J)$.

В предварительных исследованиях при численном анализе для уменьшения времени счета учитывалась связь каждого диполя только с соседями и ближайшими к ним диполями (т.е. в неограниченной в двух направлениях решетке связь диполя с 24 диполями). Однако, как показали дальнейшие исследования, данного приближения (связи диполя с диполями до второго уровня окружения) в ряде случаев оказывается недостаточно. Недостаточным при некоторых из рассматриваемых условий является также приближение до четвертого уровня окружения, поэтому в расчетах мы будем учитывать связь каждого диполя до пятого уровня, т.е., например, в неогра-

ниченной трехрядной решетке связь каждого диполя с 32 ближайшими диполями. Исследования показали, что более точное приближение в исследуемых случаях не приводит к изменению результатов.

При исследовании решеток, формируемых частицами с электрическим дипольным моментом, в основном уравнении (1) магнитный дипольный момент следует заменить на электрический дипольный момент, а магнитное поле \mathbf{H}_i — на электрическое \mathbf{E}_i . Таким образом, проводимые далее исследования и полученные в них результаты справедливы также для случая решеток электрических диполей.

3. Возбуждение в решетках минимальных доменов

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

В случае достаточного длинных и узких дипольных решеток — решеток с небольшим числом (2–6) рядов и числом диполей в каждом ряду от нескольких десятков — имеет место главным образом первая из названных конфигураций, т.е. дипольные моменты в одном ряду сонаправлены (расположение рядов с противоположным направлением моментов в таких решетках может быть различным). Однако и в этом случае решетки разбиваются на домены с противоположно направленными в соседних доменах цепочками диполей. 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 цепочками противоположно направленных 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 — конфигураций, охватывающих наименьшее число диполей. При этом будем полагать, что возмущение исходного состояния осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, воздействующего на отдельные диполи решетки.

На рис. 1 показаны стабильные доменные конфигурации, формируемые в квадратных (a) и гексагональных (b) структурах с одним–четырьмя рядами диполей

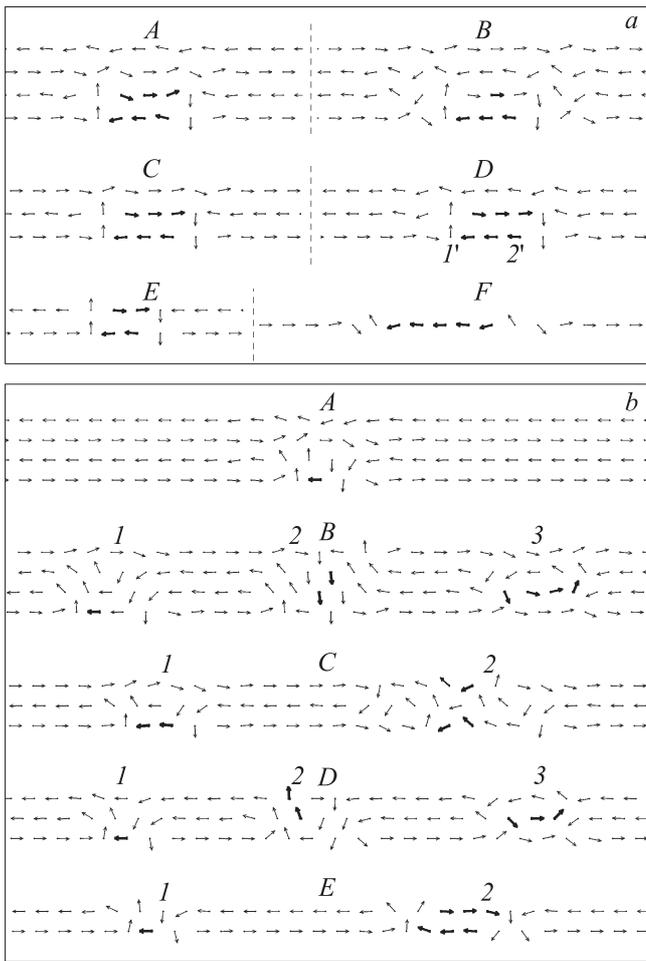


Рис. 1. Равновесные доменные конфигурации в квадратных (соседние диполи расположены в вершинах квадрата) (а) и гексагональных (соседние диполи находятся в вершинах правильного треугольника) (b) решетках, формируемые в результате возбуждения статическим магнитным полем с $|f_x| = |f_y| = 5$ наименьшего числа диполей (обозначения 1' и 2' поясняют рис. 3).

в результате наименьшего их возбуждения. Домены возбуждались статическим полем, действующим на диполи, магнитные моменты которых на рисунке отмечены жирными стрелками. Полагается, что ряды решеток ориентированы вдоль оси y . При этом внешнее поле также ориентировано вдоль данной оси в направлении, противоположном исходному направлению магнитных моментов тех диполей, на которые поле воздействует. В частности, на рис. 1, а для квадратной структуры А с чередующейся ориентацией магнитных моментов в рядах магнитное поле, действующее на три диполя внутреннего ряда (выделенные жирной линией), ориентировано в направлении $-y$, а действующее на три диполя крайнего ряда — в направлении y . Для структуры В, состоящей из четырех рядов, крайние из которых имеют магнитные моменты, ориентированные в положительном направлении оси y , а внутренние

ряды — в направлении $-y$, возмущающее магнитное поле, действующее на три диполя, ориентировано в направлении $-y$, а действующее на один диполь — в направлении y . Возбуждением шести диполей формируются также домены в квадратных решетках С и D (а) и домен с индексом 2 в двухрядной гексагональной решетке E (b); возбуждением пяти диполей — домен в цепочке диполей F (а). Возбуждение четырех диполей (помимо указанного выше домена в квадратной решетке В) требуется для формирования домена в квадратной решетке E (а), доменов 3 в гексагональной решетке В и домена 2 в решетке С (b). Возбуждением трех диполей формируется домен 3 в гексагональной решетке D (b); возбуждением двух диполей — домены 2 в решетках В и D и домен 1 в решетке С (b). Домены 1 в гексагональных решетках В, D, E и домен в решетке А формируются за счет возбуждения только одного диполя. Во всех случаях (здесь и далее) модуль внешнего поля равен $|f_x| = |f_y| = 5$. Показанные на рисунке конфигурации доменов устанавливаются уже после выключения внешнего магнитного поля и являются устойчивыми.

Следует подчеркнуть, что при возбуждении меньшего числа диполей (например, при возбуждении только пяти из шести указанных диполей квадратной решетки А или трех диполей квадратной решетки В) возникающие ориентационные конфигурации оказываются неустойчивыми и разрушаются после выключения внешнего магнитного поля, в результате устанавливается исходное однородное (однодоменное) состояние решетки. Отсюда мы можем сделать вывод, что представленные на рис. 1 домены являются минимальными (т.е. охватывающими наименьшее число диполей) стабильными ориентационными конфигурациями в рассматриваемых дипольных решетках. При этом необходимо отметить, что домен в цепочке диполей F (а) и домен 2 в гексагональной решетке E являются квазистабильными: они все же разрушаются после выключения внешнего поля, но время их разрушения велико $\tau \sim 100$, что на один-два порядка больше времени для других неустойчивых конфигураций.

Сравнение различных структур показывает, что в решетках гексагонального типа (за исключением четырехрядной решетки А) в отличие от квадратных решеток для каждой из структур обнаружено несколько видов минимальных равновесных конфигураций, формируемых возбуждением различного набора диполей. При этом в некоторых гексагональных структурах устойчивые ориентационные конфигурации формируются возбуждением только одного диполя; возникающие в этом случае домены (по сравнению с другими представленными конфигурациями) оказываются наименьшими по размеру.

На рис. 2 показана зависимость от времени суммарного магнитного момента $\mathbf{P} = \sum \rho_i$ системы диполей при формировании доменов в квадратных решетках с четырьмя рядами — в решетке А, показанной на рис. 1, а (кривая 1 на рис. 2, а), в аналогичных гексагональных решетках — в решетке А и доменов 1–3 в решетке В,

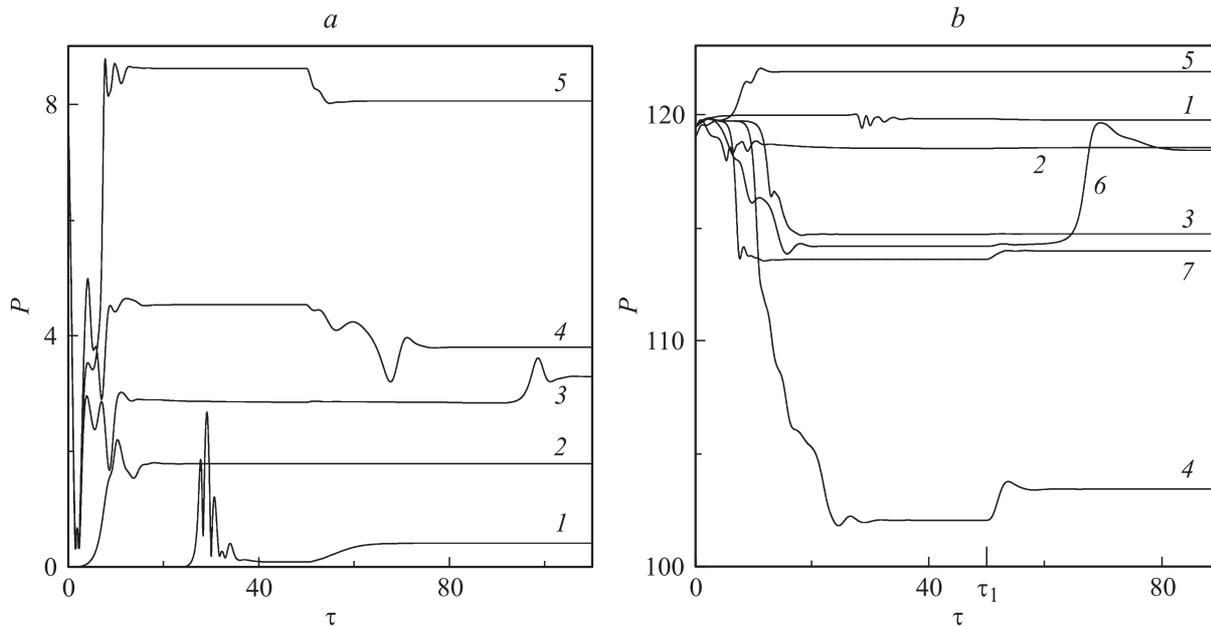


Рис. 2. Зависимость от времени суммарного магнитного момента системы при формировании доменов в квадратных решетках с четырьмя рядами *A* (кривая 1), в гексагональных решетках *A* и доменов 1–3 в решетке *B* (кривые 2–5) (*a*), а также в трехрядных квадратных решетках *C* и *D*, доменов 1, 2 в гексагональной решетке *C* и доменов 1–3 в гексагональной решетке *D* (кривые 1–7) (*b*). τ_1 — время выключения магнитного поля.

представленных на рис. 1, *b* (кривые 2–5 на рис. 2, *a* соответственно), а также в решетках с тремя рядами диполей: в квадратных решетках *C* и *D*, приведенных на рис. 1, *a*, доменов 1, 2 в гексагональной решетке *C* и доменов 1–3 в гексагональной решетке *D*, показанных на рис. 1, *b* (кривые 1–7 на рис. 2, *b* соответственно). На рисунке также отмечено время выключения внешнего магнитного поля τ_1 . Из рисунка видно, что формирование доменов в разных структурах реализуется за различное время. При этом выключение внешнего поля в одних случаях практически не изменяет установившуюся конфигурацию, а в других случаях конфигурация изменяется, и после переходного процесса устанавливается конфигурация как с меньшим, так и с большим магнитным моментом системы. В частности, из четырехрядных структур наиболее быстро реализуется формирование доменов в гексагональной решетке *A*, причем выключение внешнего поля практически не меняет возникшую в ней конфигурацию. В гексагональной решетке *B* сначала возникает нестабильный домен (подобный домену 1 в решетке *A*), который при $\tau > 80$ преобразуется в устойчивую конфигурацию. В случае суммарного магнитного момента решеток с тремя рядами следует учитывать, что здесь рассматриваются системы со 120 диполями в каждом ряду и свободными граничными условиями, при этом магнитные моменты одного ряда оказываются некомпенсированными (свободными граничными условиями объясняется также близкий к 8 магнитный момент исходной гексагональной решетки с четырьмя рядами). К наиболее быстрому для трехрядных структур также

относится формирование доменов 1 в гексагональных решетках (рис. 1, *b*) и в квадратной решетке *B* (однако в последнем случае, напомним, необходимо возбуждение внешним полем сразу шести диполей). В случае двухрядных структур при формировании домена в квадратной структуре и домена 2 в гексагональной структуре суммарный магнитный момент в течение всего процесса практически не изменяется и близок к нулю.

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 изменение во времени магнитного момента системы при подавлении домена в четырехрядной *A* (*a*), двухрядных (*b*) и трехрядных *D* (*c*) структурах квадратного (штриховая линия) и гексагонального (сплошная линия) типов: в гексагональных структурах рассматриваются домены с индексом 1; цифрами 1 и 2 на рис. 3, *c* отмечены зависимости, полученные при разрушении домена в квадратной решетке *D* за счет воздействия внешним полем на различные входящие в него диполи. Из рисунка видно, что разрушение доменов в четырехрядных и двухрядных решетках сопровождается затухающими колебаниями магнитного момента системы; в трехрядных решетках такие колебания, как правило, отсутствуют. При этом время разрушения различно для разных доменных конфигураций, однако для большинства случаев находится в интервале $\tau \approx 10$ –20.

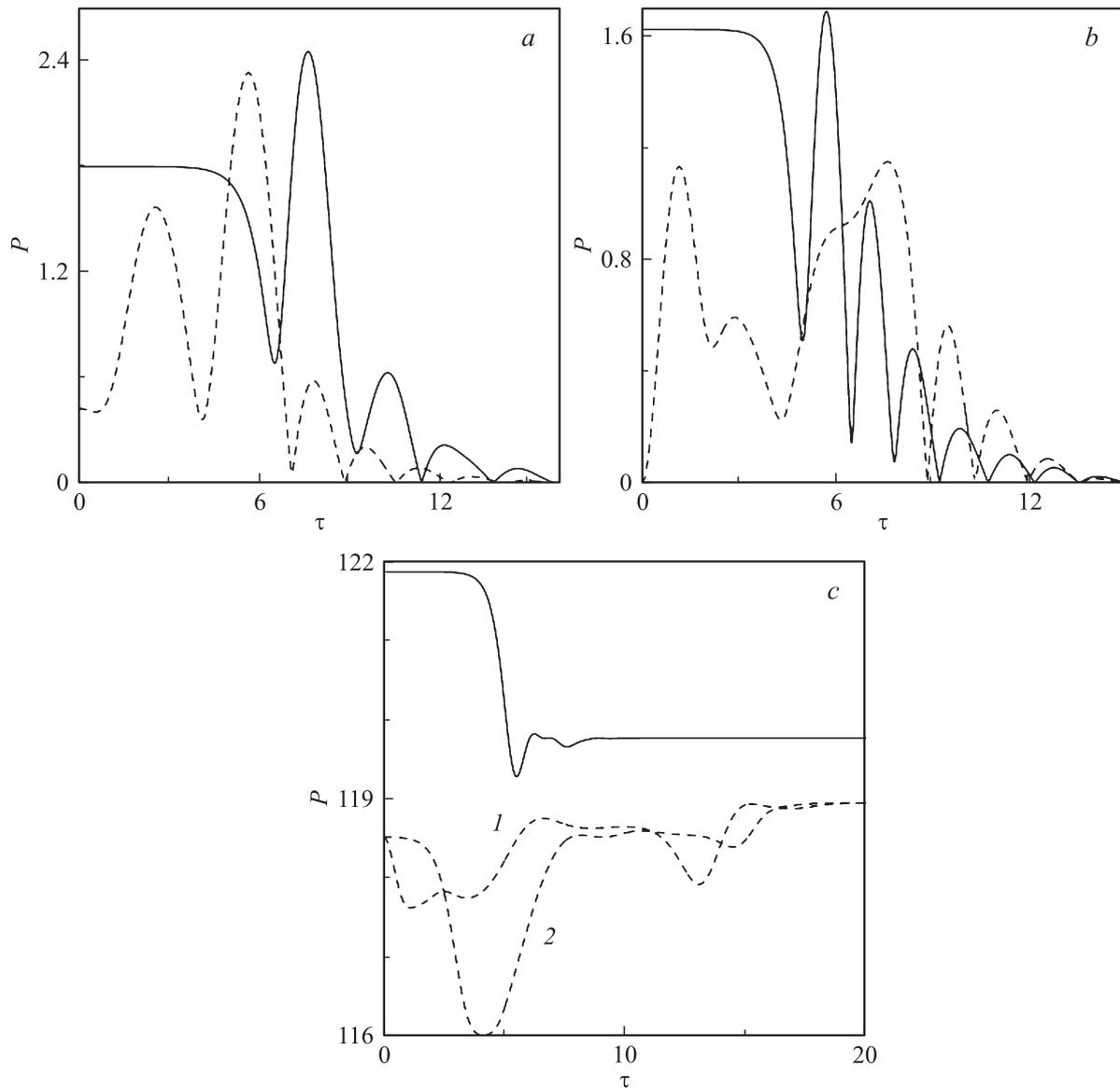


Рис. 3. Изменение во времени магнитного момента системы при подавлении домена в четырехрядной *A* (*a*), двухрядных (*b*) и трехрядных *D* (*c*) структурах квадратного (пунктир) и гексагонального (сплошная линия) типов (домены с индексом *l*). Цифры *l* и *2* (*c*) отвечают разрушению домена за счет воздействия на различные диполи (диполи *l'* и *2'* на рис. 1 соответственно).

Рассмотрим изменение энергии диполь-дипольного взаимодействия решеток при формировании и подавлении в них доменных конфигураций. Выражение для энергии взаимодействия *i*-го и *k*-го диполей имеет вид

$$W_{ik} = \frac{\mathbf{p}_i \mathbf{p}_k - 3(\mathbf{p}_i \mathbf{e}_{ik})(\mathbf{p}_k \mathbf{e}_{ik})}{l_{ik}^3}. \quad (4)$$

За нулевой энергетический уровень примем энергию диполь-дипольного взаимодействия решетки до формирования в ней доменных конфигураций. На рис. 4 приведена зависимость от времени энергии взаимодействия системы $W_0 = \sum_i \sum_k (W_{ik} - W'_{ik}) / (2p^2)$, где W'_{ik} — энергия взаимодействия между двумя диполями в исходном однородном состоянии решетки, при формировании и

подавлении домена в четырехрядной *A* (*a*) и двухрядной (*b*) квадратных решетках, а также доменов *2*, *3* в четырехрядной *B* (*c, d*) и доменов *1*, *2* в трехрядной *D* (*e, f*) гексагональных решетках. В каждом из представленных случаев сначала имеет место возбуждение диполей внешним полем, далее поле выключается и формируется окончательная равновесная конфигурация домена (которой, как видно из рисунка, в ряде случаев предшествуют квазистабильные состояния); некоторое время структура со сформированным доменом находится в равновесном состоянии; затем снова включается внешнее поле, возбуждающее один из диполей доменной конфигурации для ее подавления, после чего структура приходит к исходному однородному состоянию. Сплошная и штриховая линии на рисунке отвечают

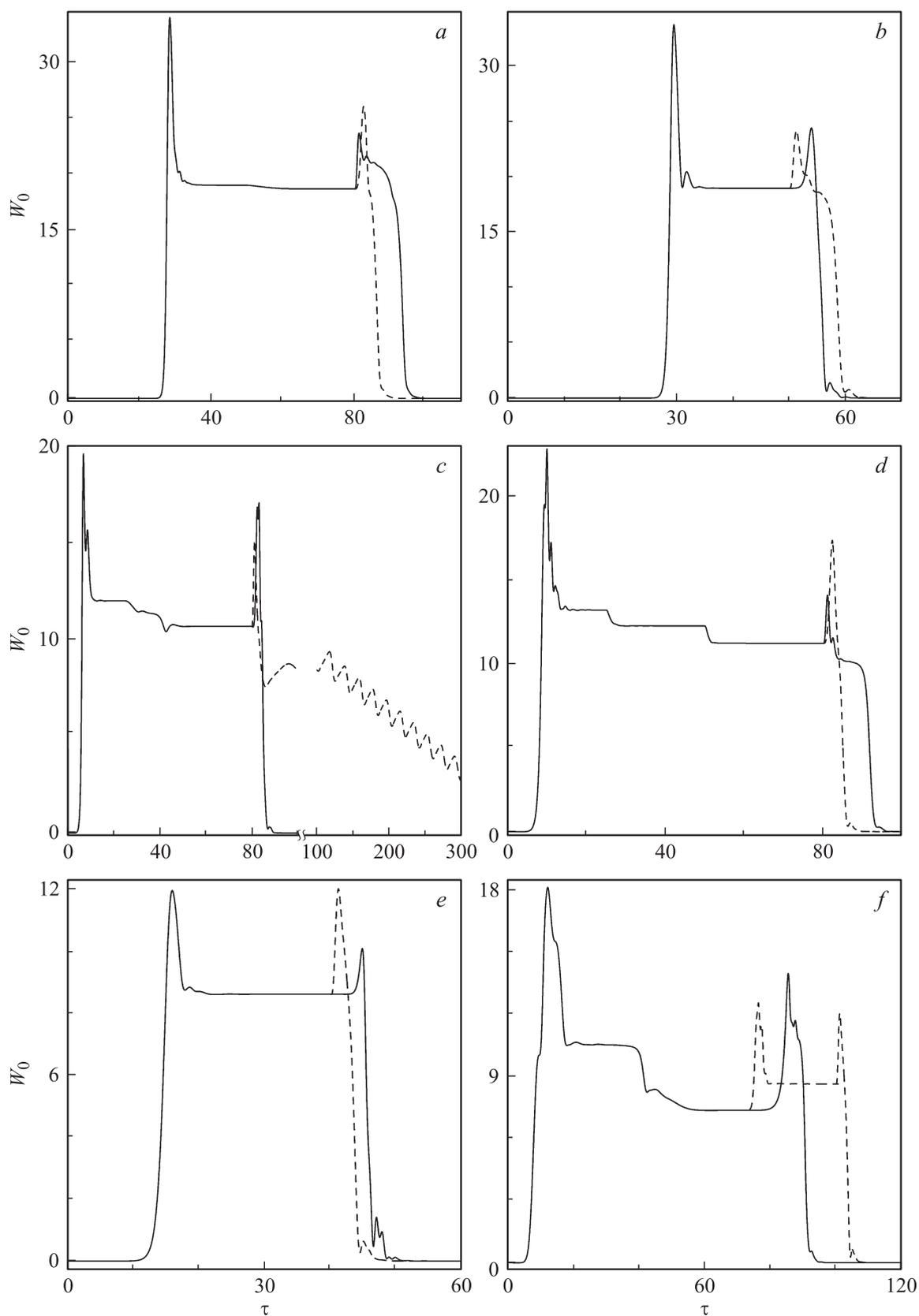


Рис. 4. Зависимость от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия системы (за нулевой уровень принята энергия исходного состояния) при формировании и подавлении домена в четырехрядной *A* (*a*) и двухрядной (*b*) квадратных решетках; доменов 2, 3 в четырехрядной *B* (*c, d*) и доменов 1, 2 в трехрядной *D* (*e, f*) гексагональных решетках. Сплошная и штриховая линии отвечают воздействию поля на различные диполи (во избежание существенного усложнения восприятия рис. 1 на нем не указаны конкретные диполи, на которые производилось воздействие).

воздействию внешнего поля на два различных диполя, входящих в доменную конфигурацию (на какие диполи производилось воздействие полем, не указываем, чтобы избежать чрезмерной перегрузки рисунков).

Более подробно следует остановиться на рис. 4, *c* и *f*. На рис. 4, *c* сплошная линия отвечает разрушению домена и установлению исходного равновесного состояния после воздействия внешним полем на один из диполей домена; штриховая линия отвечает воздействию поля на другой диполь, что приводит к разрушению домена и возникновению фазового перехода с распространяющимся на всю решетку фронтом, переводящим ее в иную однородную конфигурацию. При возникающем фазовом переходе магнитные моменты двух верхних рядов оказываются направленными в одну сторону, а двух нижних рядов — в другую. Заметим, что данный фазовый переход не удастся осуществить возбуждением диполей исходного (однородного) состояния решетки. Для его реализации сначала необходимо сформировать в решетке соответствующий домен, после чего фазовый переход запускает возбуждение входящего в него диполя. На рис. 4, *f* сначала в структуре формируется домен 2 в гексагональной решетке *D*. Далее, сплошная линия отвечает разрушению домена за счет воздействия поля на один из диполей конфигурации и переходу решетки в исходное состояние. Штриховая линия отвечает воздействию поля на другой диполь, что приводит к преобразованию домена 2 в домен 1 (рис. 1, *b*), далее очередным воздействием поля на один из диполей возникшей конфигурации домен 1 подавляется, и решетка приходит в начальное однородное состояние.

Из рисунка видно, что воздействие внешнего поля на исходную дипольную решетку резко увеличивает ее энергию, после чего с формированием доменной конфигурации энергия падает, не доходя до уровня однородной решетки. При разрушении домена внешним полем энергия также вначале возрастает. При этом энергетические барьеры, которые необходимо преодолеть для разрушения домена, различны для случаев воздействия на разные диполи, различным является также и время разрушения домена: более быстрому разрушению отвечает больший энергетический барьер. В случае фазового перехода (штриховая кривая на рис. 4, *c*) имеют место периодически повторяющиеся интервалы относительного уменьшения и роста энергии дипольного взаимодействия, однако за период процесса фазового перехода энергия системы уменьшается. Другие реализующиеся в рассматриваемых дипольных решетках фазовые переходы будут обсуждаться далее.

В рамках практических вопросов информационных технологий важными являются исследования возможной плотности формирования в решетках различных доменов. При этом формируемые домены не должны сливаться и преобразовываться в домены других форм и размеров, а значит, должна сохраняться возможность уничтожения конкретного единичного домена без разрушения соседних доменов. В качестве примера рассмот-

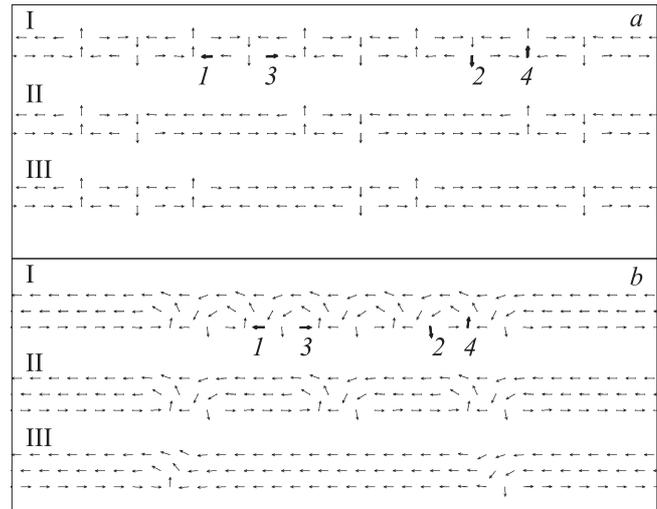


Рис. 5. Наиболее плотное расположение пяти доменов (I) в квадратной (*a*) и гексагональной (*b*) решетках, уничтожение двух из пяти доменов (II) за счет воздействия полем на выделенные диполи 1 и 2 (поворот в направлении y и $-y$ соответственно), результат воздействия (III) полем на диполи 3 и 4 (поворот в направлении $-y$).

рим формирование и уничтожение наиболее компактных доменов в квадратной решетке (на рис. 1, *a* домен в структуре *E*) и гексагональной решетке (на рис. 1, *b* домен 1 в структуре *D*). На рис. 5 показано наиболее плотное расположение пяти указанных доменов в соответствующих решетках (I). При этом показано уничтожение двух из пяти доменов (II) за счет воздействия внешним полем на выделенные диполи 1 и 2 (поворот их в направлении y и $-y$ соответственно); показан также (III) результат воздействия внешним полем на другие диполи: 3 и 4 (поворот в направлении $-y$). Из рисунка видно, что расположение пяти выбранных доменов оказывается более компактным для гексагональной решетки. Данное расположение позволяет путем определенного воздействия на диполи, входящие в домены, уничтожать в отдельности каждый из пяти сформированных доменов без разрушения соседних. Очевидно, что более плотное расположение доменов невозможно (произойдет слияние доменов и формирование одного большого домена).

Заметим, что в случае квадратной решетки при такой плотности формирования рассматриваемых доменов имеет место некоторая условность: пространство решетки между доменами представляет собой такой же домен, только иначе ориентированный. В результате направление воздействия на диполь, ориентированный перпендикулярно оси y , определяет, какой из доменов будет разрушен. В частности, при повороте диполя 4 вправо (в направлении y) разрушен будет крайний из пяти одинаково ориентированных доменов, а при повороте этого диполя влево будет разрушен симметричный ему домен (который можно рассматривать также

как пространство между четвертым и пятым одинаково ориентированными доменами), что и показано на рис. 5, *a* (III). Несколько иная ситуация имеет место в случае гексагональной решетки (рис. 5, *b*): в случае воздействия на диполь, не входящий в один из плотноупакованных доменов (диполь 3), или же при повороте в сторону междоменного пространства одного из диполей, ориентированных перпендикулярно оси y (диполь 4), происходит уничтожение всех плотноупакованных доменов и формирование большого домена, в котором диполи одного внешнего ряда оказываются противоположно ориентированными относительно диполей этого ряда в соседних (не входящих в домен) областях решетки. Таким образом, поворот диполя 4 (на рис 5, *b*) вправо — в направлении домена — приводит к разрушению лишь пятого из первоначально сформированных доменов, а поворот этого же диполя влево — в направлении междоменного пространства — приводит к разрушению всех пяти доменов (III).

4. Фазовые переходы в решетках диполей

Возбуждение внешним полем некоторых из рассматриваемых решеток, как уже отмечалось, может приводить также к фазовому переходу ориентации дипольных магнитных моментов, фронт которого постепенно распространяется вдоль дипольной решетки. Исследуем подобные фазовые переходы в различных структурах, а также необходимые для их возникновения условия.

В квадратной решетке, состоящей из трех рядов диполей, в качестве исходной примем равновесную конфигурацию, при которой два соседних ряда имеют одинаковое направление дипольных моментов, а третий ряд ориентирован противоположно (решетка *D* на рис. 1, *a*). Воздействие магнитного поля на два диполя крайнего („верхнего“) ряда данной решетки приводит к возникновению фазового перехода, устанавливающего конфигурации с сонаправленными диполями крайних рядов (и противоположно направленными им диполями среднего ряда), т.е. формируется решетка *C*. Фронт фазового перехода распространяется в двух направлениях по всей решетке. На рис. 6 приведено несколько этапов данного процесса при начальном возбуждении диполей (первоначально ориентированных в направлении $-y$), которые показаны на рисунке жирными стрелками.

Подобный фазовый переход имеет место также в гексагональных трехрядных решетках. Однако есть определенные различия. Для возникновения фазового перехода в гексагональных решетках в качестве исходной следует брать конфигурацию с сонаправленными диполями двух крайних рядов (решетка *C* на рис. 1, *b*). При этом в зависимости от возмущающего воздействия внешнего поля после прохождения фронта фазового перехода могут устанавливаться две различные конфигурации: при

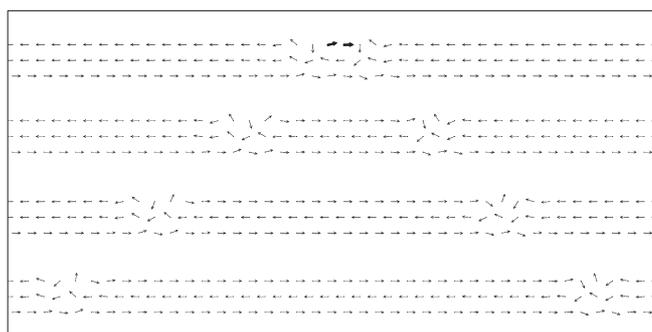


Рис. 6. Движение фронта фазового перехода в квадратной решетке при начальном возбуждении полем двух диполей (показанных жирными стрелками).

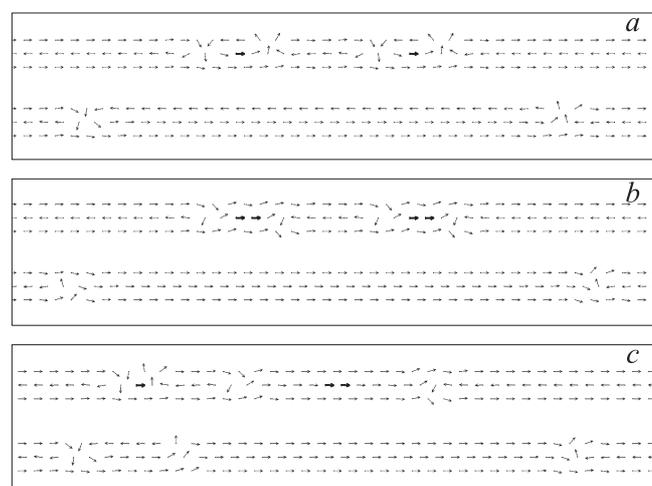


Рис. 7. Развитие двух областей фазового перехода в гексагональной решетке при возбуждении одного (*a*) и двух (*b*) диполей (показанных жирными стрелками), а также слияние областей данных фазовых переходов (*c*).

воздействию на один диполь среднего ряда устанавливается конфигурация с сонаправленными диполями двух соседних рядов (при противоположной ориентации второго крайнего ряда — решетка *D*), а при возбуждении двух диполей среднего ряда — конфигурация с сонаправленными по всей решетке диполями, причем скорость второго фазового перехода значительно больше, чем для первого.

При встрече двух фронтов одинаковых фазовых переходов происходит их взаимное поглощение (как в гексагональных, так и в квадратных решетках). На рис. 7, *a, b* показано развитие и объединение двух описанных выше фазовых переходов в трехрядной гексагональной решетке *C*. На рис. 7, *c* показано развитие в данной решетке процесса столкновения двух фронтов различных фазовых переходов (слева возбуждается фазовый переход, приводящий к структуре с двумя сонаправленными соседними рядами диполей, справа — со всеми тремя сонаправленными рядами). При объединении двух

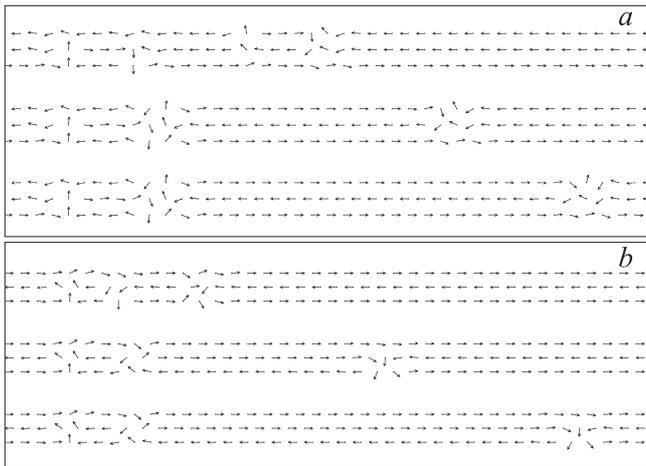


Рис. 8. Развитие области фазового перехода в квадратной (а) и гексагональной (b) решетках при формировании слева от нее домена, препятствующего продвижению в этом направлении фронта фазового перехода.

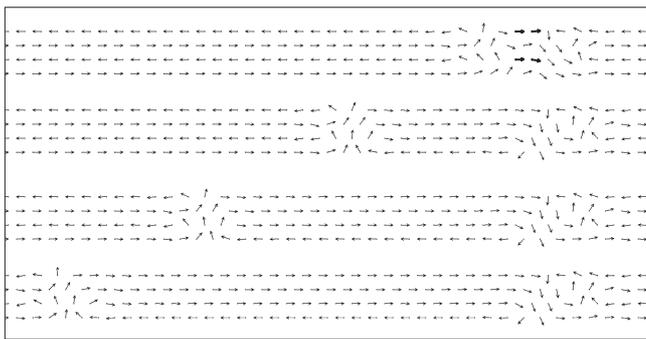


Рис. 9. Однонаправленный фазовый переход без предварительного формирования устойчивого домена в четырехрядной гексагональной решетке B (при возбуждении двух диполей „первого“ (снизу) и „третьего“ реализуется фазовый переход, распространяющийся вправо).

различных встречных фронтов возникает устойчивый стационарный домен (охватывающий пять диполей) с различной справа и слева от него конфигурацией решетки. При этом противоположные фронты возбужденных фазовых переходов продолжают движение по решетке (с различной скоростью), устанавливая соответствующую ориентацию диполей.

В трехрядных решетках осуществляется также однонаправленное продвижение фронта фазового перехода благодаря созданию впереди одного из фронтов равновесного домена. На рис. 8 слева от областей фазовых переходов в квадратной (а) и гексагональной (b) решетках сформированы устойчивые домены, которые препятствуют продвижению в этом направлении фронтов фазовых переходов. Аналогичный процесс осуществляется также для второго из рассмотренных фазовых переходов в трехрядной гексагональной решетке, однако для его

реализации требуется предварительное формирование другого устойчивого домена — строящегося за счет воздействия на три диполя каждого из крайних рядов решетки (на рис. 1 данный домен не показан).

Однонаправленный фазовый переход без предварительного формирования устойчивого домена осуществляется в четырехрядной гексагональной решетке B . На рис. 9 показано развитие указанного процесса. Возбуждение внешним полем двух диполей „второго“ и двух диполей „четвертого“ ряда (магнитные моменты которых показаны на рисунке жирной стрелкой) приводит к развитию фазового перехода, фронт которого распространяется только влево, при этом справа диполи формируют устойчивое доменное образование. В результате устанавливается конфигурация с тремя однонаправленными дипольными рядами. При возбуждении двух диполей „первого“ и „третьего“ („снизу“) рядов реализуется фазовый переход с противоположным — правосторонним — фронтом распространения.

На рис. 10 показано изменение во времени величины суммарного магнитного момента P при описанных выше процессах фазовых переходов: в квадратной (кри-

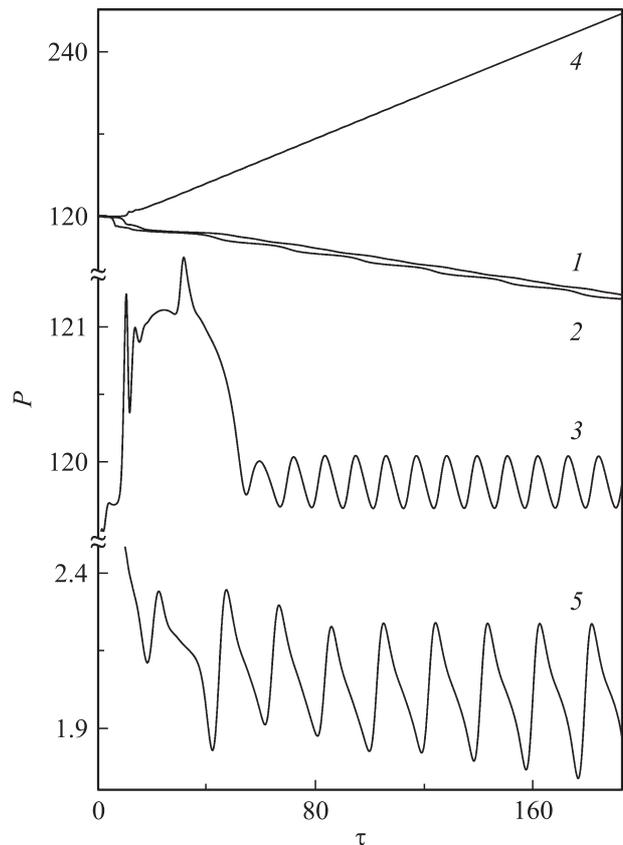


Рис. 10. Изменение во времени магнитного момента системы при продвижении фронта фазового перехода в квадратной (кривые 1, 2 — возбуждение двух и трех диполей), гексагональной (кривые 3, 4 — возбуждение одного и двух диполей) трехрядных решетках и четырехрядной гексагональной решетке (кривая 5).

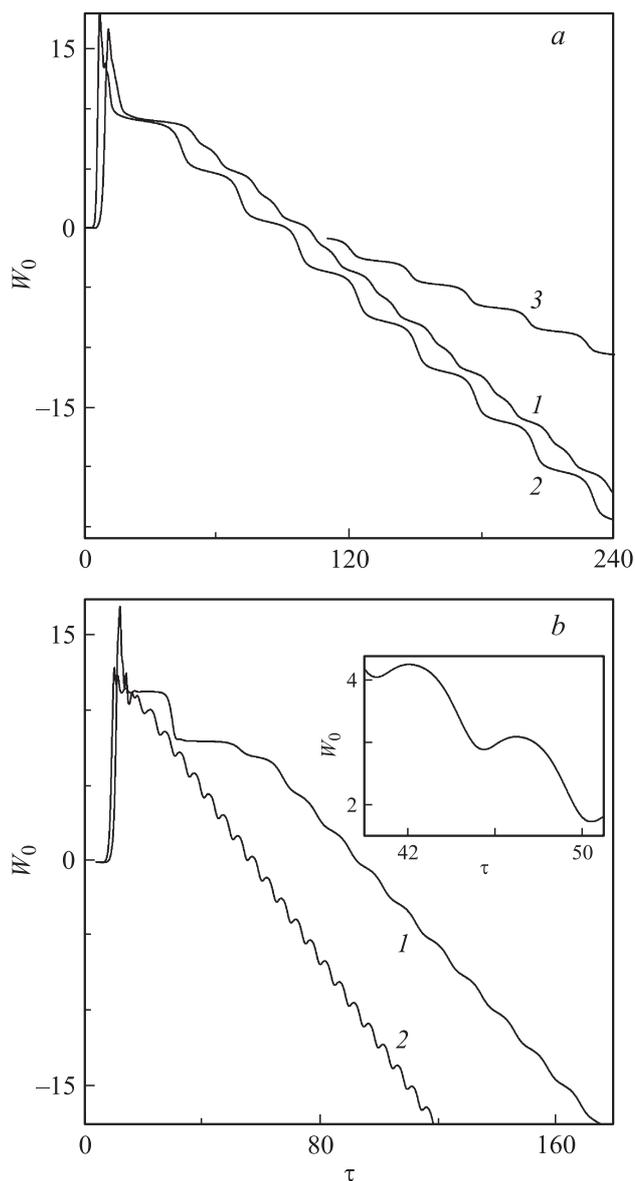


Рис. 11. Зависимость от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия при фазовых переходах в трехрядных решетках: *a* — в квадратной (кривые 1 и 3 — возбуждение 2 диполей; кривая 2 — возбуждение трех диполей; кривая 3 отвечает блокированию одного фронта фазового перехода); *b* — в гексагональной (кривые 1, 2 — возбуждение одного и двух диполей соответственно).

вые 1, 2) и гексагональной (кривые 3, 4) трехрядных решетках (в каждом ряду решеток 120 диполей) и четырехрядной гексагональной решетке (кривая 5). В случае фазовых переходов в квадратных решетках (рис. 6) меняется на противоположную ориентация магнитных моментов только одного из рядов, поэтому на начальном этапе магнитный момент решетки уменьшается по закону, близкому к линейному. Однако когда фазовый переход охватывает половину системы, магнитный момент начинает расти и затем приходит к значениям, близким

к исходным ($P \approx 120$). Фазовый переход, отвечающий кривой 1, осуществляется возбуждением двух диполей, а соответствующий кривой 2 — трех диполей крайнего ряда (различие этих процессов обсуждается далее). В случае первого фазового перехода в гексагональной решетке (рис. 7, *a*), отвечающего кривой 3, меняются направления магнитных моментов сразу двух рядов, поэтому при продвижении его фронтов имеют место низкоамплитудные ($\Delta P < 1$) колебания магнитного момента систем, которые оказываются близки к гармоническим. В случае второго фазового перехода в трехрядной гексагональной решетке (рис. 7, *b*) происходит изменение магнитных моментов только одного ряда, которое, однако, увеличивает магнитный момент системы (все три ряда оказываются сонаправленными), поэтому в ходе всего фазового перехода имеет место близкий к линейному рост величины P . Фазовый переход, отвечающий кривой 5, осуществляется в случае предварительного возбуждения в четырехрядной решетке B устойчивого домена (см. штриховую линию на рис. 4, *c*). При нем также возникает близкое к периодическому низкоамплитудное изменение магнитного момента системы P .

На рис. 11 показано изменение во времени энергии диполь-дипольного взаимодействия W_0 (за нулевой уровень принимается энергия исходного состояния решетки) для фазовых переходов в квадратной (*a*) и гексагональной (*b*) трехрядных решетках. Кривая 1 на рис. 11, *a* соответствует фазовому переходу, возникающему в результате возбуждения двух диполей, а кривая 2 — переходу, возникающему в результате возбуждения трех диполей. В процессе данных фазовых переходов энергия системы монотонно уменьшается, при этом имеют место интервалы относительно медленного уменьшения энергии, сменяющиеся интервалами быстрого ее изменения. Наиболее отчетливо это видно из кривой 2. Однако оба фазовых перехода одинаковы, разница между ними заключается в том, что в первом случае (отвечающем кривой 1) продвижение правого и левого фронтов находится в различных фазах, тогда как во втором случае (кривая 2) оба фронта распространяются синфазно. Это подтверждает кривая 3, отвечающая распространению только одного фронта фазового перехода, вызванного возбуждением двух диполей (продвижение второго фронта блокировалось предварительным возбуждением впереди него домена, рис. 8, *a*). Видно, что периодичность изменения энергии при этом аналогична случаю кривой 2.

На рис. 11, *b* кривая 1 отвечает фазовому переходу в гексагональной решетке при возбуждении одного диполя среднего ряда, а кривая 2 — фазовому переходу при возбуждении двух диполей (рис. 7, *a* и *b* соответственно). В первом случае также имеет место монотонное убывание энергии системы. Во втором случае периоды уменьшения энергии сменяются периодами ее роста, однако в конечном счете энергия системы падает (с большим разрешением изменение энергии при данном фазовом переходе приведено на вставке). Частота колебаний

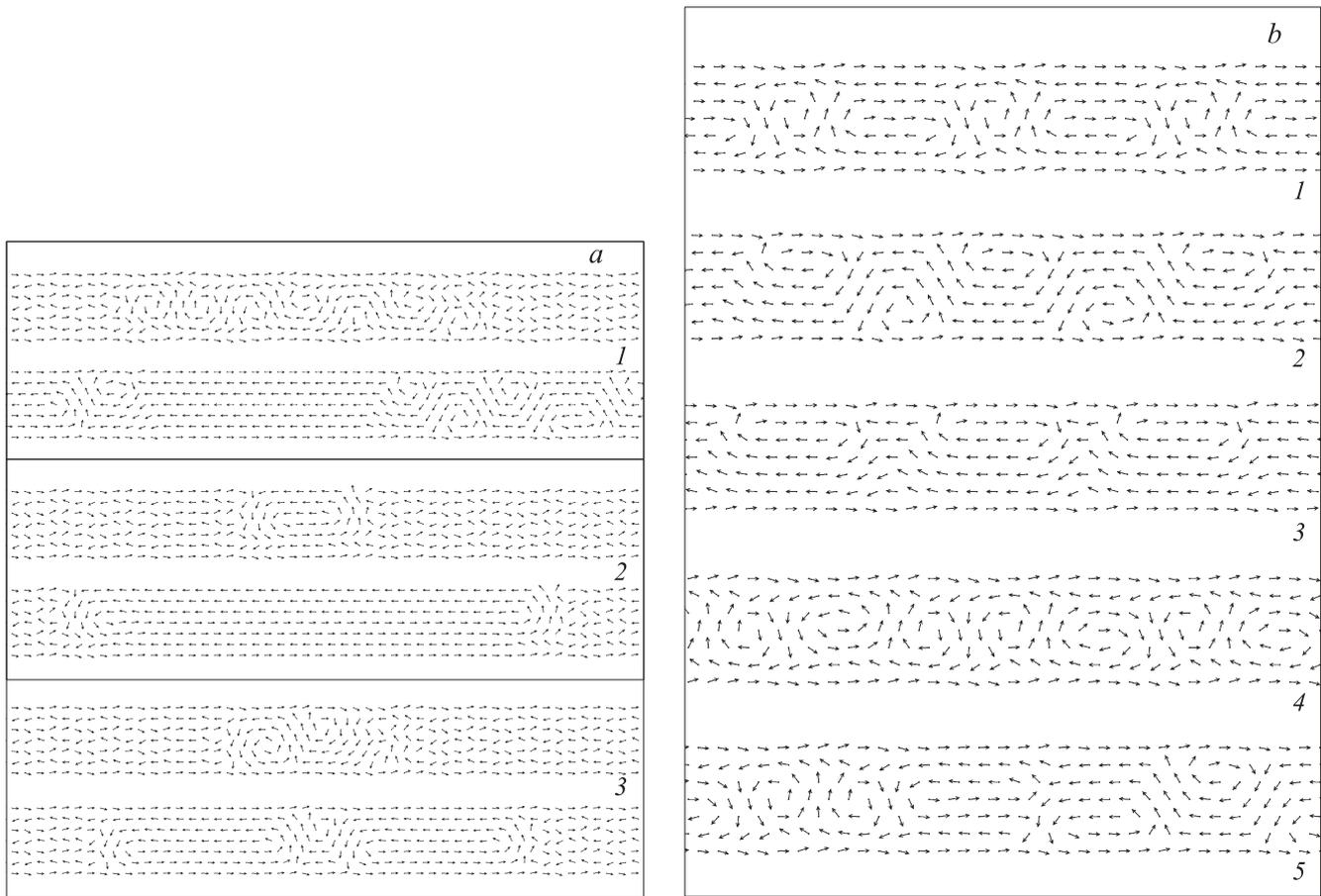


Рис. 12. *a*) Развитие фазовых переходов в гексагональной решетке с семью рядами и параметром конфигурации a (диаграмма 1), $0.8a$ (диаграммы 2 и 3); фазовые переходы вызваны возбуждением одного (диаграммы 1 и 2) и трех (диаграмма 3) диполей; величина поля $|f| = 20$. *b*) Устойчивые конфигурации, возникающие в гексагональной решетке с характерным параметром $0.8a$ (диаграмма 1), $0.7a$ (2), $0.57a$ (3, 4), $0.53a$ (5) при продвижении фронта фазовых переходов. Конфигурации 3 и 4 возникли при единичном возбуждении решетки в различных (близкорасположенных) ее областях.

представленных зависимостей определяется скоростью продвижения фронта фазового перехода. Видно, что с наибольшей скоростью распространяется второй фронт фазового перехода в гексагональной решетке (кривая 2 на рис. 11, *b*), переводящий диполи всех трех рядов в сонаправленное состояние.

При увеличении числа рядов в решетке значительно возрастает разнообразие стационарных режимов и возбуждаемых в системе доменов, в том числе вихреподобных образований, а также фазовых переходов, причем фазовые переходы зачастую приводят не к однородному состоянию, а к сложной конфигурации, включающей домены различной величины и формы. Трудной задачей при этом является выявление параметров и возбуждений системы, при которых реализуется заданная конфигурация диполей. В качестве примера на рис. 12 приведены различные состояния решетки, состоящей из семи рядов. Как показали исследования, важным параметром, определяющим различные возможные состояния системы, является расстояние между диполями. На рис. 12, *a*

приведены возбуждаемые фазовые переходы при характерном параметре конфигурации a (диаграмма 1), т.е. таком же, как в рассмотренных выше случаях, и при $0.8a$ (диаграммы 2 и 3). Фазовые переходы, отвечающие диаграммам 1 и 2, вызывались возбуждением одного диполя, а последний из приведенных переходов — возбуждением трех диполей. Следует заметить, что в рассматриваемой системе противоположная ($\pm u$) ориентация диполей соседних рядов является неустойчивой, и их направления смещаются относительно продольного к рядам решетки. Фазовый переход, отвечающий диаграмме 1, приводит решетку к сложной конфигурации, включающей различные вихреобразные конфигурации. Два других фазовых перехода приводят систему к однородному состоянию с магнитными моментами, ориентированными вдоль решетки, т.е. по оси y (исключение составляет центральное доменное образование в случае третьего фазового перехода).

На рис. 12, *b* приведены различные по форме конфигурации, возникающие в решетке с характерным па-

раметром $0.8a$ (диаграмма 1), $0.7a$ (2), $0.57a$ (3, 4), $0.53a$ (5) при продвижении фронта фазового перехода, распространяющегося от границы системы (граничные диполи здесь выступают в качестве возбуждающего фактора). Следует заметить, что данные конфигурации не распространяются на всю решетку и в ряде случаев могут одновременно присутствовать в решетке (см., в частности, диаграммы 3–5). Из рисунка видно, что в представленных решетках устанавливаются преимущественно различные по форме вихреобразные конфигурации.

5. Заключение

Проведенный анализ выявил конфигурации минимальных — охватывающих наименьшее число диполей — стационарных доменов, возбуждаемых в квадратных и гексагональных решетках, состоящих из одного—четырех рядов диполей. Показано, что возбуждение таких доменов осуществляется изменением ориентации магнитных моментов нескольких (от 1 до 6 в зависимости от решетки и формируемого домена) диполей решетки с помощью внешнего магнитного поля. Получено время формирования доменов, изменение при этом суммарного магнитного момента решеток и энергии диполь-дипольного взаимодействия. Выявлено, что для уничтожения доменов и возвращения решеток к исходному состоянию, как правило, достаточно воздействия внешним полем на один входящий в домен диполь. От того, на какой из диполей осуществляется воздействие, зависят время разрушения домена и величина преодолеваемого при этом энергетического барьера. В отличие от квадратных решеток для гексагональных структур характерным является возможность формирования нескольких типов доменов путем возбуждения различного набора диполей решетки. Наиболее компактные доменные конфигурации, строящиеся за счет возбуждения только одного диполя, также реализуются в гексагональных решетках; время формирования и уничтожения таких доменов, как правило, является наименьшим. В квадратных системах наиболее компактные домены строятся в двухрядных структурах. Для указанных доменных конфигураций в квадратной двухрядной и гексагональной трехрядной решетках приведена максимальная плотность их формирования.

В результате исследования выявлены условия, при которых в квадратных и гексагональных решетках возникают фазовые переходы, меняющие конфигурацию системы — ориентацию дипольных моментов в рядах структуры. Фазовые переходы с симметрично распространяющимися в обе стороны фронтами реализуются в трехрядных решетках при возбуждении одного—трех диполей системы. В гексагональных трехрядных решетках в зависимости от набора возбуждаемых диполей реализуется два типа фазовых переходов, сильно отличающихся друг от друга скоростью распространения

фронтов. Благодаря формированию впереди одного из фронтов фазового перехода устойчивой доменной конфигурации как в гексагональных, так и в квадратных решетках реализуется однонаправленное распространение фазового перехода (продвижение второго фронта блокируется доменом). Фазовый переход с однонаправленным распространением без предварительного формирования домена достигается в четырехрядной гексагональной структуре в результате подбора возбуждаемых диполей: при возбуждении определенного набора диполей возникает фазовый переход только с правым фронтом распространения, при возбуждении другого соответствующего набора диполей — только с левым фронтом распространения. В структурах с большим числом рядов значительно увеличивается разнообразие возникающих доменных конфигураций, что осложняет управление ими за счет воздействия внешнего поля. В качестве примера приведены фазовые переходы и несколько равновесных состояний в гексагональной решетке с семью рядами диполей. Показано, что для них характерным является формирование различных по форме вихреобразных доменов.

В работе двумерные решетки в одном направлении принимались практически неограниченными: в каждом ряду более сотни диполей, и все домены формировались вдали от края; таким образом, соответствующие краевые эффекты не влияли на возникающие доменные конфигурации. Рассмотрение решеток с малым числом рядов оправдано следующим. Целью работы было выявление минимальных доменных конфигураций, но, как показали расчеты, уже в решетках, содержащих более шести рядов, диполи в каждом ряду становятся не сонаправленными, и состояние всей решетки оказывается неустойчивым к возникновению ориентационных неоднородностей: разбиванию решетки на несколько доменных областей, возникновению различных вихреобразных структур, охватывающих большое число диполей, и т.д. Очевидно, что для записи и хранения информации подобные неоднородные состояния являются отрицательным фактором. Отсюда ясно, что данные состояния не отвечают поставленным в работе задачам (формированию и уничтожению минимальных доменов в однородных состояниях). Кроме того, проведенные исследования показали, что для формирования доменов наименьшим требуемым воздействием на решетку является возмущение диполей крайних рядов системы, причем формируемые при этом домены оказываются наименьшими.

Допущение воздействия на отдельные диполи (возможность переориентации выделенных диполей) также объясняется и оправдывается постановкой задачи — выявить условия формирования минимальных устойчивых доменных конфигураций, так как для формирования минимальных доменов требуется минимальное воздействие на решетку (в пределе на один-два диполя). При этом следует также учитывать, что речь идет о телах (в частности, наночастицах), обладающих дипольным момен-

том, причем расчеты проводились без конкретизации природы диполей. Однако способ влияния на выделенные диполи является важным вопросом, который должен решаться отдельно в каждом конкретном случае на базе достигнутых технических возможностей. В заключение необходимо отметить, что полученные результаты имеют общий характер и справедливы для различных систем с диполь-дипольным взаимодействием.

Список литературы

- [1] Б.Н. Филиппов, Л.Г. Корзунин. *ЖЭТФ* **121**, 372 (2002).
- [2] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко, А.Г. Пашко. *ФТТ* **47**, 1806 (2005).
- [3] Д.И. Семенцов, А.М. Шутый. *УФН* **177**, 831 (2007).
- [4] А.М. Шутый. *ЖЭТФ* **135**, 1009 (2009).
- [5] А. Пятаков. *ПерсТ* **17**, 13/14, 4 (2010).
- [6] S. Seki, X.Z. Yu, S. Ishiwata, Y. Tokura. *Science* **336**, 198 (2012).
- [7] R. Skomski. *J. Phys.: Cond. Matter* **15**, R841 (2003).
- [8] А.Ю. Галкин, Б.А. Иванов. *Письма в ЖЭТФ* **83**, 450 (2006).
- [9] С.А. Гусев, Ю.Н. Ноздрин, М.В. Сапожников, А.А. Фраерман. *УФН* **170**, 331 (2000).
- [10] I.A. Becker, A. Chatelain, W.A. Heer. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 4067 (1993).
- [11] С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров. *Неорган. материалы* **38**, 1287 (2002).
- [12] И.Р. Каретникова, И.М. Нефедов, М.В. Сапожников, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский. *ФТТ* **43**, 2030 (2001).
- [13] С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков. *Успехи химии* **74**, 539 (2005).
- [14] Ф.В. Лисовский, О.П. Полякова. *Письма в ЖЭТФ* **73**, 546 (2001).
- [15] А.М. Шутый. *ЖЭТФ* **137**, 277 (2010).