

Фазовые переходы в решетках магнитных диполей

© А.М. Шутый

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

(Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.)

Исследованы двумерные гексагональные решетки магнитных диполей с 3–6 числом рядов. На основе численного анализа выявлены условия возбуждения фазовых переходов, меняющих ориентационную конфигурацию систем. Получены изменения магнитного момента системы и энергии диполь-дипольного взаимодействия при возникновении фазовых переходов. Рассмотрены как симметричные фазовые переходы, одинаково распространяющиеся в обе стороны решетки от области возбуждения, так и несимметричные переходы, когда конфигурации системы слева и справа от области возбуждения различны. Выявлены условия реализации однонаправленных фазовых переходов, при которых вдоль решетки распространяется либо левый, либо правый фронт фазового перехода.

Введение

Интерес к самоорганизующимся системам, в том числе к ансамблям наночастиц, приобрел 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 вследствие возможности эффективного управления их состоянием. При этом 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. В последние годы ведется систематическое изучение и внедрение в практику создаваемых нанотехнологиями [5] магнитных сверхструктур. Среди них особый интерес представляют двумерные сверхструктуры, в частности, в виде решеток магнитных наночастиц с формой, близкой к круговой, на немагнитной подложке — такие частицы часто называют магнитными точками [6]. Упорядоченные структуры ферромагнитных наночастиц могут быть сформированы методом нанолитографии [7], 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 $3\mu_B$ [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].

Для задач сверхплотной записи и хранения информации наиболее актуальным является изучение формируемых в дипольных решетках доменов и осуществляемых

фазовых переходов, меняющих ориентационную конфигурацию решеток. Последнее обусловлено тем, что в решетках с различной исходной ориентацией диполей устанавливаются различные минимальные по размеру и устойчивости доменные структуры [11]. В настоящей работе исследуются фазовые переходы в гексагональных решетках диполей, состоящих из малого (3–6) числа рядов. Проводится расчет суммарного магнитного момента и энергии связи диполей, изменяющихся в результате фазовых переходов. Наряду с симметричными фазовыми переходами, одинаково распространяющимися как влево, так и вправо вдоль решетки, исследуются несимметричные и однонаправленные фазовые переходы, имеющие только левый, или только правый фронт распространения.

Исходные уравнения

Рассматривая систему диполей, полагаем, что каждый из них связан с другими диполь-дипольными взаимодействиями и способен поворачиваться вокруг центра симметрии. Положение диполей в решетке принимается неизменным. Тела с дипольными моментами предполагаются однородными и шарообразными [12], материал — магнитоупругим. Динамические уравнения для связанных диполей имеют вид [4,13]

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

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

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

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

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 гексагональных решетках a — расстояние между ближайшими диполями. При наличии внешнего 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 [13]

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

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

Для исследования решеток, формируемых частицами с электрическим дипольным моментом, в основном уравнении (1) магнитный дипольный момент следует заменить на электрический дипольный момент и магнитное поле \mathbf{H}_i — на электрическое \mathbf{E}_i .

При численном анализе для уменьшения времени счета учитывалась связь каждого диполя только с диполями до пятого уровня окружения (т.е., например, в неограниченной трехрядной решетке связь каждого диполя внутреннего ряда с 32 ближайшими диполями). Предварительные исследования показали, что в ряде случаев более грубого приближения оказывается недостаточным, а более точное приближение является избыточным (зависимости остаются неизменными). Численный анализ проводился методом Рунге–Кутты четвертого порядка.

Фазовые переходы, вызванные минимальным возбуждением решеток

Взаимодействие дипольных моментов в неограниченных по длине решетках диполей с малым (3–6) числом рядов приводит к выстраиванию диполей вдоль рядов. При этом в каждом ряду диполи оказываются сонаправленными, а диполи соседних рядов могут иметь либо противоположную ориентацию, либо быть сонаправленными. Различные конфигурации взаимной ориентации диполей различных рядов являются устойчивыми, однако отличающимися по величине энергии диполь-дипольного взаимодействия. Последнее приводит к возможности осуществления фазовых переходов за счет возбуждения отдельных диполей решетки внешним полем, в результате реализуются изменения ориентации диполей некоторых из рядов решетки на противоположное.

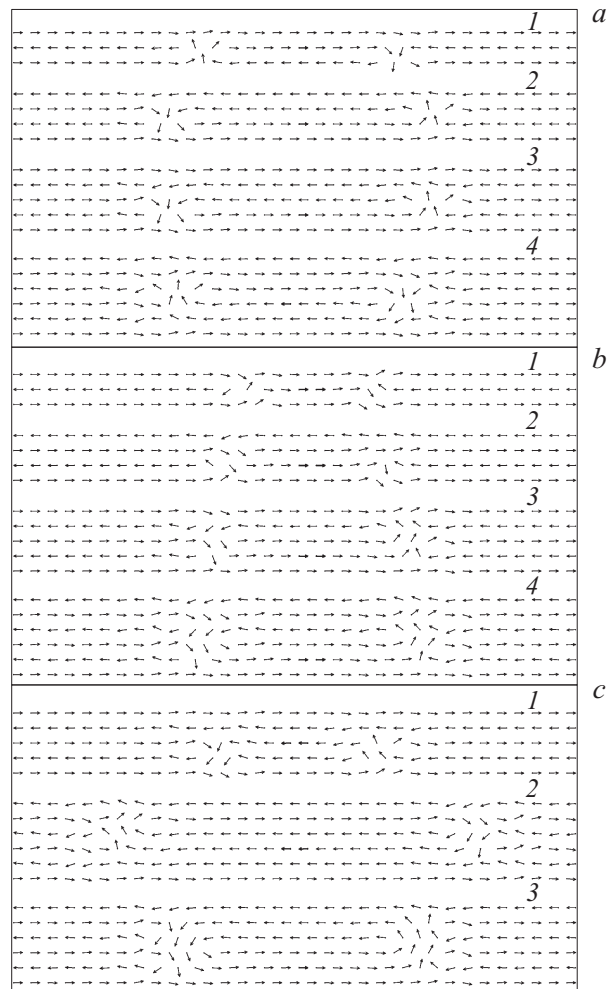


Рис. 1. Конфигурации дипольных решеток при возбуждении в них фазовых переходов за счет переориентации внешним полем диполей, выделенных жирной стрелкой (время с момента возбуждения для конфигурации 1 (a) $\tau = 105$, для остальных случаев $\tau = 55$).

Рассмотрим несколько видов фазовых переходов в решетках с различным числом рядов диполей при возбуждении внешним полем одного или двух граничащих друг с другом диполей одного ряда. В качестве исходной возьмем конфигурацию, при которой диполи соседних рядов противоположно ориентированы (как показывает дальнейшее рассмотрение, энергия диполь-дипольного взаимодействия данной конфигурации не является минимальной). Возбуждение диполей осуществляется внешним полем, направленным вдоль рядов решетки (параллельно оси y), которое переориентирует возбуждаемые диполи в направлении, противоположном исходному. Во всех случаях (здесь и далее) модуль внешнего поля равен $|f_x| = |f_y| = 5$. На рис. 1 показаны конфигурации дипольных решеток через определенное время (для конфигурации 1 на рис. 1, a $\tau = 105$, для остальных случаев $\tau = 55$) после возбуждения в них фазовых переходов. Возбуждение осуществлялось переориентацией внеш-

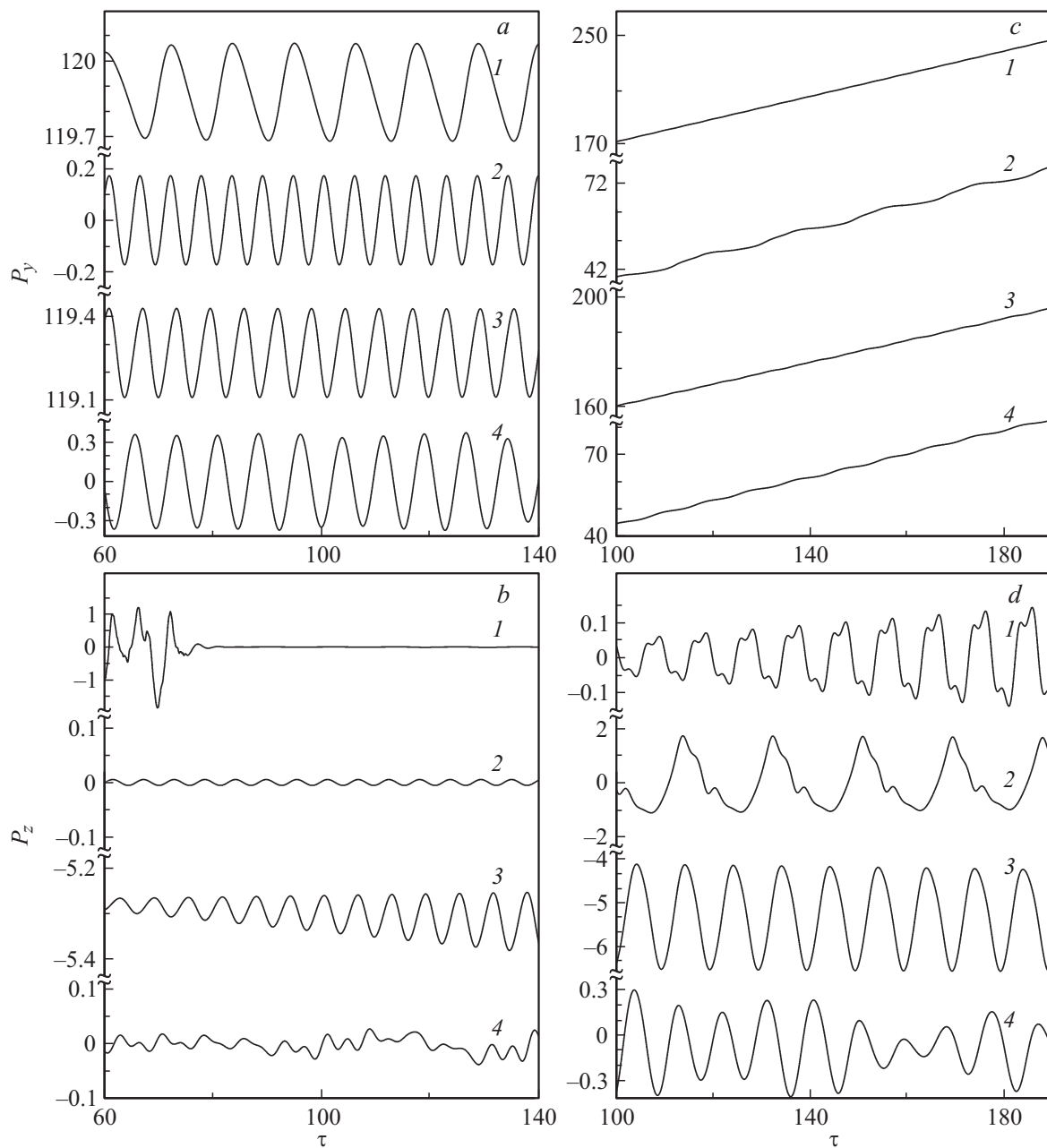


Рис. 2. Зависимость от времени составляющих суммарного магнитного момента решеток для фазовых переходов на рис. 1, *a* (соответствующие кривые на рис. 2, *a, b*) и на рис. 1, *b* (соответствующие кривые на рис. 2, *c, d*).

ним полем одного (*a, c* — решетка 3) или двух (*b, c* — решетки 1 и 2) диполей, выделенных на диаграммах жирными стрелками. В частности, на рис. 1, *a* в случае трехрядной решетки поле, ориентированное в направлении *y*, действовало на один диполь среднего ряда с исходной ориентацией в направлении $-y$; а в случае решетки с шестью рядами поле, ориентированное по $-y$, действовало на диполь третьего (снизу) ряда, ориентированного по *y*. Из рисунка видно, что фронты фазовых переходов распространяются симметрично в оба направления решеток. При фазовых переходах, представленных на рис. 1, *a*, меняется на противоположное направление

двух граничащих рядов решетки, в одном из которых располагается возбуждаемый внешним полем диполь; в результате суммарный магнитный момент системы будет сохраняться. При переходах, представленных на рис. 1, *b*, и переходах, отвечающих конфигурациям 1 и 2 на рис. 1, *c*, меняется направление диполей только одного ряда, в котором расположен возбуждаемый диполь. При переходе, отвечающем конфигурации 3 на рис. 1, *c*, меняется направление диполей двух не граничащих, симметрично расположенных в решетке рядов (в одном из которых присутствует возбуждаемый диполь). Видно также, что скорость распространения фронтов фазо-

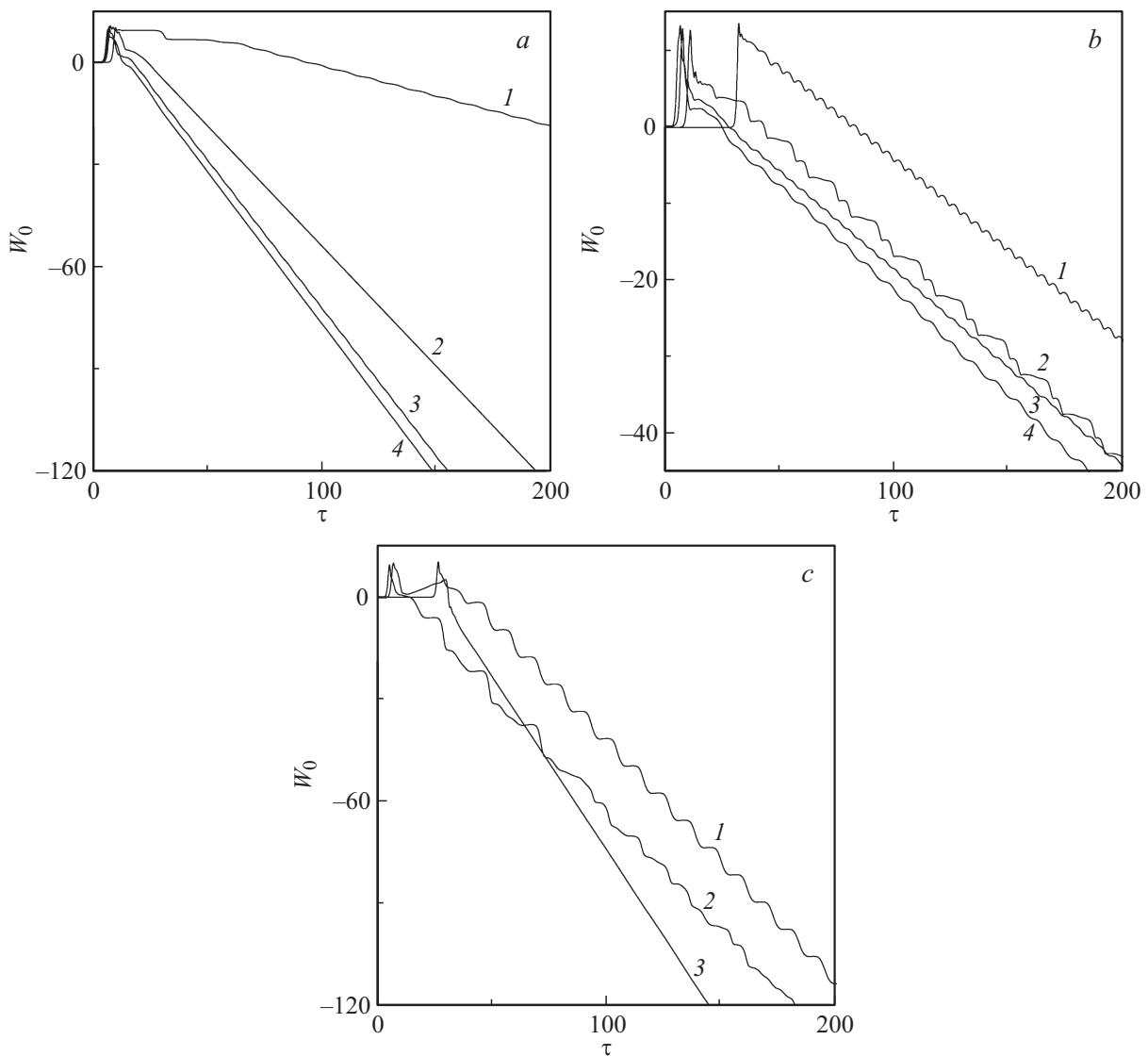


Рис. 3. Зависимость от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия решетки (за нулевой уровень принята энергия исходного состояния) при фазовых переходах, отвечающих процессам на рис. 1.

вых переходов может различаться в несколько раз для различных случаев. При этом минимальную скорость распространения имеет фазовый переход в трехрядной решетке, вызванный возбуждением одного диполя (*a*, конфигурация 1), а наибольшую скорость — фазовый переход в шестирядной решетке при возбуждении двух диполей третьего ряда (*c*, конфигурация 2).

Таким образом, выявленные фазовые переходы можно разбить на два основных типа: переходы, меняющие направление диполей двух граничащих рядов решетки, вызываемые возбуждением одного диполя, и переходы, меняющие направление только одного ряда диполей, вызываемые возбуждением двух соседних диполей одного из внутренних рядов решетки. Исключение составляет фазовый переход, отвечающий конфигурации 3 на рис. 1, *c*, а также переход в решетке с пятью рядами (не показанный на рисунке), вызванный возбуждением

одного диполя в третьем ряду — при этом реализуется переход, отвечающий конфигурации 1 на рис. 1, *c*. Следует заметить, что при возбуждении диполей только крайних рядов структуры фазовые переходы решеток не возникают, а устанавливаются стационарные доменные конфигурации [11].

На рис. 2 приведена зависимость от времени составляющих суммарного магнитного момента решеток $\mathbf{P} = \sum \rho_i$ для вышерассмотренных фазовых переходов на рис. 1, *a* (соответствующие кривые на рис. 2, *a, b*) и на рис. 1, *b* (соответствующие кривые на рис. 2, *c, d*). Из рисунка видно, что в случае распространения фазовых переходов первого из указанных типов (с изменением ориентации диполей в двух рядах) возникают колебания магнитного момента решетки, близкие к периодическим. Величина магнитного момента в решетках с тремя и пятью рядами, близкая к $P \approx 120$, объясняется тем, что

в них магнитные моменты диполей одного из рядов не скомпенсированы магнитными моментами других рядов, в численном же анализе рассматривались структуры со 120 диполями в каждом ряду. В случае распространения фазовых переходов второго из указанных типов, при которых изменяется ориентация диполей только одного ряда, имеет место монотонный рост y -компоненты суммарного магнитного момента и близкие к периодическим колебания значения его z -компоненты. В случае фазового перехода в решетке с пятью рядами, отвечающего конфигурации 1 на рис. 1, c (не представленного на рассматриваемом рисунке), на начальном этапе суммарный магнитный момент падает по закону, близкому к линейному; однако, когда фазовый переход охватывает половину системы, P начинает расти и приходит к значениям, близким к исходным ($P \approx 120$). При переходе, отвечающем конфигурации 2 (рис. 1, c), имеет место монотонное уменьшение магнитного момента решеток от нулевого значения до $P \approx -120$, а при переходе, отвечающем конфигурации 3 — близкое к периодическому колебанию величины P .

Рассмотрим изменение энергии диполь-дипольного взаимодействия решеток при возникновении в них фазовых переходов. Выражение для энергии взаимодействия i -го и k -го диполей имеет вид

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

За нулевой энергетический уровень примем энергию диполь-дипольной связи исходного состояния решетки (до возникновения фазового перехода). На рис. 3 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 фазовых переходах, отвечающих соответствующим образом случаям на рис. 1. В процессе фазовых переходов энергия системы, как и следовало ожидать, уменьшается от значения в исходной конфигурации до значения в конфигурации, устанавливающейся в решетке после фазового перехода. При этом зависимость энергии от времени может быть близкой к линейной (рис. 3, a и кривая 3 на рис. 3, c), может быть монотонной, но иметь интервалы относительно медленного уменьшения энергии, сменяющиеся интервалами быстрого ее изменения (кривые 2–4 на рис. 3, b), или иметь интервалы уменьшения энергии, сменяющиеся интервалами ее незначительного роста (кривые 1 на рис. 3, b, c), такого что в конечном результате энергия системы падает. Частота колебаний представленных зависимостей определяется скоростью продвижения фронта фазового перехода. Из рисунка видно, что в случае распространения фазовых переходов, в результате которых изменяется направление диполей

двух соседних рядов (рис. 3, a), скорость уменьшения энергии связи в системе минимальна для трехрядных решеток и растет с увеличением числа рядов (с увеличением числа рядов в сравниваемых решетках указанное различие уменьшается). В случае фазовых переходов, изменяющих направление диполей одного ряда, отвечающих рис. 3, b , скорости уменьшения энергии приблизительно равны, однако при аналогичных фазовых переходах, отвечающих кривым 1 и 2 на рис. 3, c , а также при фазовом переходе, отвечающем кривой 3 на рис. 3, c (при котором изменяется направление диполей двух не граничащих рядом, см. рис. 1, c), данная скорость оказывается в 3 раза большей.

При возбуждении в структуре вблизи друг от друга двух фазовых переходов, отвечающих установлению различной конфигурации диполей решеток, объединение двух соответствующих противоположно направленных фронтов фазовых переходов приводит к возникновению области, подобной доменной стенке. На рис. 4 приведены данные ориентационные образования при возбуждении в решетках различных фазовых переходов (исходная конфигурация решеток принималась прежней). Данные образования являются устойчивыми и статичными, по обе стороны от которых распространяются различные фронты фазовых переходов, и устанавливаются соответствующие ориентационные конфигурации решеток. В случаях, отвечающих на рисунке диаграммам 1–4 конфигурации, устанавливаемые справа и слева от возникших „доменных стенок“, отличаются ориентацией диполей одного ряда, в случаях 5, 6 и 7 — ориентацией диполей трех, четырех и двух рядов соответственно. При этом суммарный магнитный момент структуры слева P_l и справа P_r от „доменной стенки“ в случае 6 одинаков и близок к нулю, а в остальных случаях он различен: для диаграммы 1 $P_l \approx N_l$ и $P_r \approx 3N_r$ (где N_l и N_r — число диполей слева и справа от „доменной стенки“), для 2 $P_l \approx 0$ и $P_r \approx 2N_r$, для 4 $P_l \approx N_l$ и $P_r \approx 3N_r$, для 5

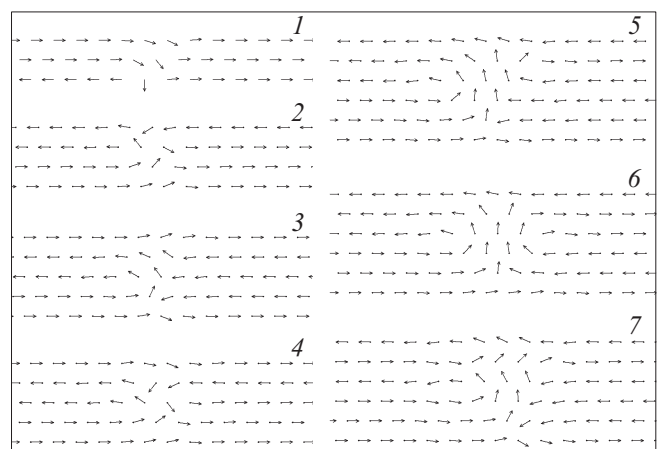


Рис. 4. Конфигурации решеток (включая центральную неподвижную область), установившиеся при слиянии двух противоположно направленных фронтов различных фазовых переходов.

$P_l \approx 0$ и $P_r \approx -2N_r$, в случаях 3 и 7 значения данных параметров соответственно равны $P_l \approx N_l$, $P_r \approx -N_r$ и $P_l \approx 2N_l$, $P_r \approx -2N_r$, и, следовательно, при равенстве $N_l = N_r$ суммарный момент всей решетки $P = P_l + P_r$ (как и в случае б) близок к нулю.

Фазовые переходы при возбуждении диполей в нескольких рядах решеток

За счет воздействия внешним полем на определенные комплексы диполей удастся возбуждать в решетках различные фазовые переходы. На рис. 5 показаны фазовые переходы, возбуждаемые при воздействии на диполи, расположенные в нескольких рядах решетки, — вектора магнитных моментов данных диполей выделены на рисунке жирной стрелкой: в случае 1 возбуждается по одному диполю в 1, 2 и 3 рядах, в случае 2 — по два диполя в этих же рядах, в 3 — один диполь в 1 и один в 5 рядах, в 4 — возбуждаются по два соседних диполя в 1, 3 и 5 рядах; исходная конфигурация решеток принималась прежней (рис. 1), поле направлено в сторону, противоположную исходной ориентации данных диполей. Во всех представленных случаях в центральной области фазового перехода возникает ориентационное образование типа „доменной стенки“, по обе стороны от которого распространяются фронты фазового перехода. В случаях 1–3 правый и левый фронты имеют одинаковую скорость распространения, в случае 4 правый фронт распространяется быстрее. Центральные области могут быть как неподвижными, что наблюдается в случаях 1 и 2, так и двигаться с малой скоростью — в случаях 3 и 4 центральные области смещаются вправо (движения фронтов и центральных областей на рисунке условно показаны векторами различной длины). Во всех

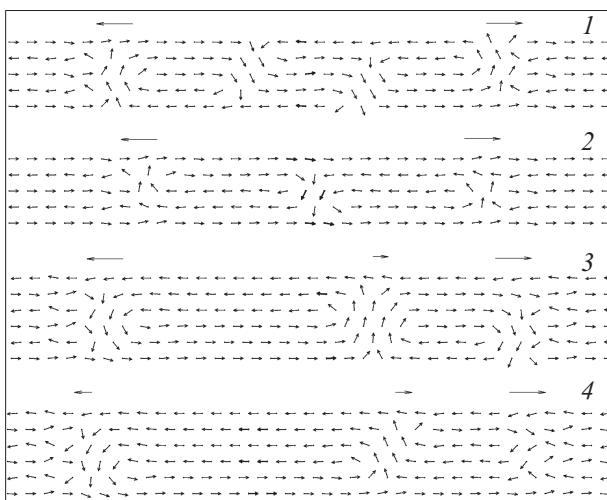


Рис. 5. Фазовые переходы, возбуждаемые при воздействии на диполи, магнитные моменты которых выделены жирными стрелками; движение фронтов фазовых переходов и центральных областей показано стрелками (длина стрелок качественно отражает отношение соответствующих скоростей).

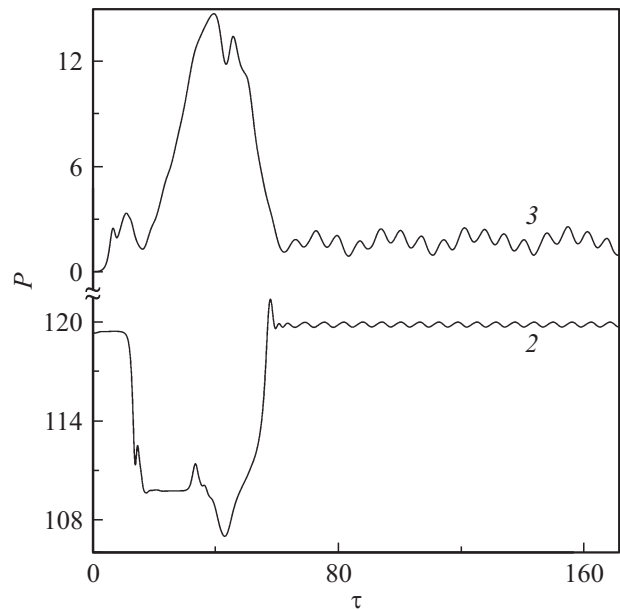


Рис. 6. Зависимость от времени суммарного магнитного момента решеток для случаев, отвечающих диаграммам 2 и 3 на рис. 5 (кривые 2 и 3 соответственно).

представленных случаях число рядов решетки, ориентированных вправо (влево), одинаково по обе стороны от центральной области. Различие наблюдается в конкретных рядах, ориентированных в ту или иную сторону. В частности, в случае 3 слева от центральной области ориентированы вправо 1, 2 и 3 (отсчитывая снизу) ряды, а справа от центральной области — 1, 3 и 5 ряды.

На рис. 6 для случаев, отвечающих диаграммам 2 и 3 предыдущего рисунка, приведена зависимость от времени суммарного магнитного момента решеток. Видно, что для рассматриваемых фазовых переходов характерным является продолжительный по времени начальный переходной период, после которого величина P с продвижением фронтов фазового перехода изменяется периодически.

В решетке, содержащей четыре ряда, при возбуждении по два соседних диполя в первом и третьем (или во втором и четвертом) рядах реализуется однонаправленный фазовый переход — фронт фазового перехода распространяется вдоль решетки только в одном направлении: вправо при возбуждении диполей 1 и 3 рядов и влево при возбуждении диполей 2 и 4 рядов. В результате с одной из сторон от области возбуждения диполей устанавливается конфигурация с тремя однонаправленными дипольными рядами — направление магнитных моментов данных рядов противоположно направлению распространения фронта фазового перехода. По две диаграммы для развивающихся „правого“ и „левого“ однонаправленных фазовых переходов приведено на рис. 7 (стрелками показано направление фронтов фазовых переходов).

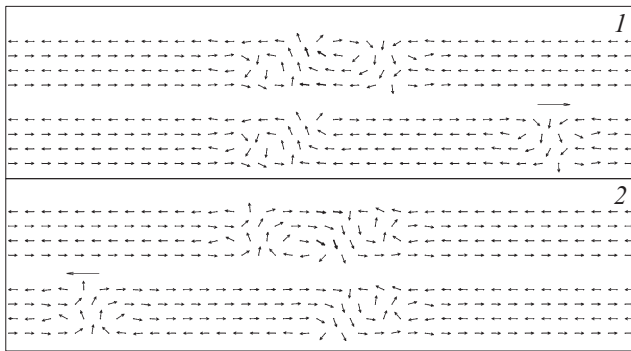


Рис. 7. Однонаправленные фазовые переходы с правым и левым движением фронта (диаграммы 1 и 2); возбуждение соответствующих фазовых переходов осуществляется за счет воздействия внешнего поля на диполи, выделенные жирными стрелками.

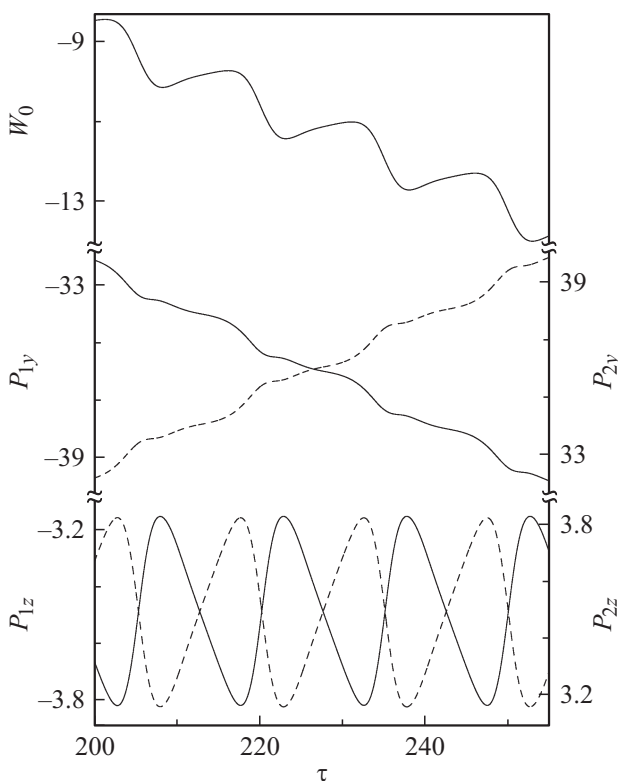


Рис. 8. Зависимости от времени компонент суммарного магнитного момента P_{1y} , P_{1z} „правого“ (непрерывная линия) и компонент P_{2y} , P_{2z} „левого“ (штриховая линия) однонаправленных фазовых переходов и энергии диполь-дипольного взаимодействия решеток.

На рис. 8 приведены зависимости от времени компонент суммарного магнитного моментов P_{1y} , P_{1z} „правого“ (непрерывная линия) и компонент P_{2y} , P_{2z} „левого“ (штриховая линия) однонаправленных фазовых переходов, а также зависимости от времени энергии диполь-дипольного взаимодействия решетки (одинаковая для обоих фазовых переходов). Видно, что энергия связи

в ходе развития однонаправленных фазовых переходов уменьшается — зависимость $W_0(\tau)$ имеет периоды незначительного роста, сменяющиеся периодами падения энергии. При этом y -компонента магнитного момента системы монотонно уменьшается в случае „правого“ и монотонно увеличивается в случае „левого“ фазовых переходов, z -компонента суммарного магнитного момента изменяется в ходе развития фазовых переходов периодически.

Заключение

Проведенный анализ гексагональных решеток, состоящих из 3–6 рядов диполей, показал, что при исходной противоположной ориентации диполей соседних рядов реализуются различные возбуждаемые внешним полем фазовые переходы системы, приводящие к изменению ее конфигурации. При фазовых переходах происходит изменение ориентации диполей одного или нескольких рядов решеток. В случае переориентации диполей четного числа рядов магнитный момент решетки остается прежним, в случае же нечетного числа рядов (одного, трех) магнитный момент решетки, как правило, возрастает по модулю. Наиболее распространенными являются фазовые переходы, вызываемые возбуждением (переориентацией с помощью внешнего поля) одного диполя или двух соседних диполей внутреннего ряда решетки; в первом случае имеет место изменение на противоположное ориентации двух рядов диполей, во втором — одного ряда диполей.

При возбуждении в решетке вблизи друг от друга двух различных фазовых переходов, и последующем слиянии их противоположно направленных фронтов возникает „доменная стенка“, по обе стороны от которой с различной скоростью устанавливаются соответствующие конфигурации. Данные, устанавливаемые справа и слева от „доменной стенки“ конфигурации, могут либо отличаться расположением одинаково направленных рядов диполей, либо иметь различные суммарные магнитные моменты (различное число рядов, направленных в ту или иную сторону). Подобные сложные — несимметричные — фазовые переходы с центральной (как подвижной, так и неподвижной) областью возникают также при возбуждении внешним полем диполей в нескольких рядах решеток. При этом конфигурации, устанавливаемые справа и слева от центральной области, отличаются только расположением одинаково направленных рядов.

В структуре, содержащей четыре ряда диполей, при возбуждении по два соседних диполя в первом и третьем рядах реализуется однонаправленный фазовый переход: распространяется только правый фронт фазового перехода, при возбуждении соответствующих диполей второго и четвертого рядов фазовый переход распространяется вдоль решетки только в левом направлении от области возбуждения. Следует заметить, что резуль-

таты данного исследования справедливы для различных систем как магнитных, так и электрических диполей.

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.

Список литературы

- [1] Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 2. С. 372–387.
- [2] Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х., Пашико А.Г. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 10. С. 1806–1812.
- [3] Семенов Д.И., Шутый А.М. // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831–857.
- [4] Шутый А.М. // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. Вып. 5. С. 1009–1010.
- [5] Skomski R. // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. R841–R896.
- [6] Галкин А.Ю., Иванов Б.А. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83. Вып. 9. С. 450–454.
- [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. Vol. 71. N 24. P. 4067–4070.
- [9] Губин С.П., Кокшаров Ю.А. // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 11. P. 1287–1304.
- [10] Каретникова И.Р., Нефедов И.М., Сапожников М.В., Фраерман А.А., Шерешевский И.А. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 2030–2034.
- [11] Шутый А.М. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 54–58.
- [12] Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [13] Шутый А.М. // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. Вып. 2. С. 277–286.