

Управление ориентационными переходами в скрещенных дипольных решетках

© А.М. Шутый

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

(Поступило в Редакцию 16 мая 2014 г. В окончательной редакции 10 октября 2014 г.)

Рассматривая ориентационные переходы в решетках с тремя рядами диполей, исследуются структуры, состоящие из скрещенных перпендикулярных решеток, и условия прохождения через область перекрестья фронта ориентационного перехода, вызванного внешним полем в одной из частей структуры. Установлено, что продвижением фронта ориентационного перехода можно управлять, изменяя конфигурацию области перекрестья за счет предварительного возбуждения в одной из частей системы другого ориентационного перехода, или за счет переориентации диполей, входящих в область перекрестья. Показано, что в зависимости от состояния перекрестья может: не пропускать фронт ориентационного перехода, пропускать его без изменений, изменять направление фронта перехода или изменять исходный ориентационный переход на другой, а также производить „ветвление“ фронта перехода и реализовывать „некоммутативные“ свойства.

Введение

Интерес к самоорганизующимся системам, в том числе к ансамблям наночастиц, приобрел особое значение в связи с достижениями в области информационных технологий и наноструктур. Ансамбли однодоменных частиц являются также удобными объектами для изучения ориентационных переходов и других коллективных эффектов вследствие возможности эффективного управления их состоянием. В последние годы ведется систематическое изучение и внедрение в практику создаваемых нанотехнологиями [1] дипольных, в частности магнитных, сверхструктур. Среди них особый интерес представляют двумерные сверхструктуры в виде квадратных решеток наночастиц с формой, близкой к круговой [2]. Упорядоченные структуры ферромагнитных наночастиц могут быть сформированы методом нанолитографии [3], 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 $3\mu_B$ [4]. Уже сейчас разброс наночастиц по размерам при соответствующем контроле может не превышать 5% [5]. Дипольный момент наночастиц можно считать классической величиной, и основной вклад в их взаимодействие в случае однодоменного состояния вносит диполь-дипольное взаимодействие [3,6].

В работе [7] исследовались ориентационные переходы в решетках диполей, состоящих из 3–6 рядов элементов. В настоящей работе рассматриваются возможности управления фронтом ориентационного перехода, который возбуждается в системе двух скрещенных трехрядных решеток диполей. Выявлены механизмы воздействия на область перекрестья, позволяющего создать условия для прохождения за перекрестьем ориентационного перехода, для изменения направления распространения его фронта, его преобразования в другой ори-

ентационный переход или „ветвления“ фронта ориентационного перехода; выявлены также „некоммутативные“ свойства перекрестья дипольных решеток.

Исходные уравнения

Рассматривая систему диполей, полагаем, что каждый из них связан с другими диполь-дипольным взаимодействием и способен поворачиваться вокруг центра симметрии. Положение диполей в системе принимается неизменным. Тела с дипольными моментами принимаются однородными и шарообразными [8]. Динамические уравнения для системы диполей имеют вид [9–11]

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

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

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

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 рассматриваемых квадратных решетках a — расстояние между ближайшими диполями в ряде и между рядами. При наличии внешнего поля \mathbf{f} оно добавляется к

полю (2). Составляющие решетку диполи принимаются идентичными: $|\mathbf{p}_i| = p$, $J_i = J$, $\alpha_i = \alpha$. Далее удобно сделать переход к безразмерным параметрам [9,10]

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

где $v = \sqrt{p^2/Ja^3}$, и дифференцирование проводится по безразмерному времени $\tau = vt$. Компоненты внешнего поля преобразуются к виду $\phi_j = f_j p/(v^2 J)$. В случае решеток, формируемых частицами с магнитным дипольным моментом, в уравнениях (1), (2) \mathbf{F}_i и \mathbf{f} являются напряженностями магнитных полей; в случае решеток электрических диполей в выражения входят соответственно напряженности электрических полей.

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

Ориентационные переходы

Взаимодействие дипольных моментов в неограниченных по длине решетках диполей с малым числом рядов приводит к выстраиванию диполей вдоль рядов [12]. При этом в каждом ряду диполи сонаправлены, а диполи соседних рядов могут иметь либо противоположную ориентацию, либо быть сонаправленными. Как показывает анализ, у рассматриваемых систем есть несколько устойчивых ориентационных конфигураций, отличающихся направлением диполей в рядах решетки. Так как данные конфигурации отличаются по величине энергии диполь-дипольного взаимодействия, имеет место возможность осуществления ориентационных переходов за счет возбуждения (переориентации) внешним полем отдельных частиц решетки, в результате чего реализуются изменения ориентации определенных рядов системы на противоположное [12]. В трехрядных квадратных решетках конфигурация с сонаправленной ориентацией всех рядов является устойчивой, однако имеющей наибольшую, по сравнению с другими устойчивыми конфигурациями, величину энергии диполь-дипольного взаимодействия. Таким образом, целесообразно именно данное состояние решетки брать в качестве исходного.

В случае одинаково ориентированных рядов трехрядной системы, воздействие внешним полем на три соседних диполя одного ряда в направлении, противоположном исходному, приводит к ориентационному переходу, в результате которого происходит переориентация всех диполей данного ряда. На рис. 1 представлены две стадии развивающегося ориентационного перехода, вызванного переориентацией с помощью внешнего поля

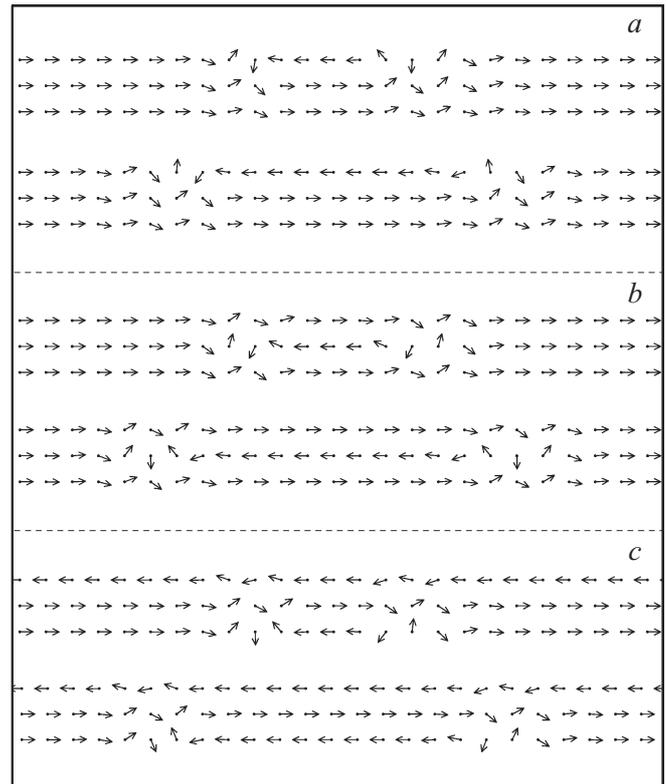


Рис. 1. Движение фронта ориентационных переходов в квадратной трехрядной решетке в случае начального возбуждения диполей в крайнем (а) и среднем (б) рядах при исходной однонаправленной ориентации рядов решетки и диполей крайнего ряда (с) при исходной однонаправленной ориентации данного и среднего рядов.

трех соседних диполей „верхнего“ (а) и среднего (б) рядов решетки при исходной сонаправленной ориентации всех рядов, и трех диполей „нижнего“ ряда (с) при исходной конфигурации с двумя сонаправленными соседними рядами („нижним“ и „средним“) и одним рядом с противоположной ориентацией. Во всех случаях модуль внешнего поля равен $|\phi| = |\phi_y| = 5$. Таким образом, при конфигурации с сонаправленными рядами могут быть осуществлены три ориентационных перехода (изменяющих ориентацию одного из трех рядов решетки) и при исходной конфигурации с двумя соседними сонаправленными рядами — один ориентационный переход. Конфигурация с двумя сонаправленными крайними рядами и средним противоположно направленным рядом имеет наименьшую энергию диполь-дипольного взаимодействия, и при исходном данном состоянии ориентационные переходы не реализуются. Из рисунка также видно, что фронты ориентационных переходов симметрично распространяются от области возбуждения в оба направления решетки.

Для приведенных переходов на рис. 2, а дана зависимость от времени суммарного дипольного момента $\mathbf{P} = \sum \rho_i$ системы диполей (а) и на рис. 2, б — зависимость от времени нормированной энергии взаимодей-

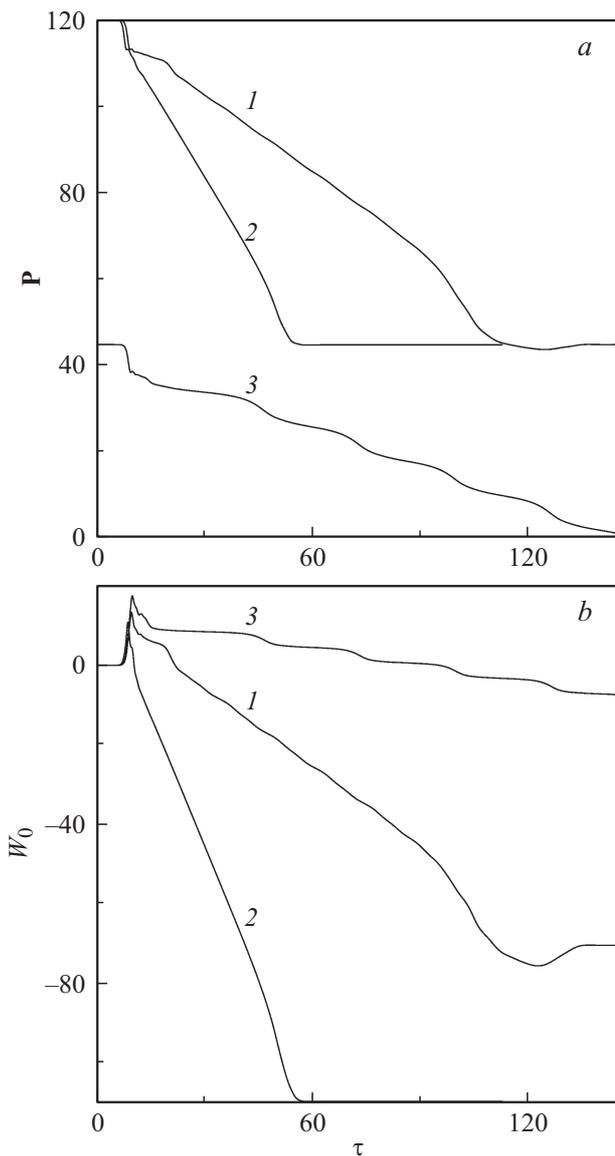


Рис. 2. Зависимость от времени суммарного дипольного момента (а) и энергии диполь-дипольного взаимодействия трехрядной системы (b) (за нулевой уровень принята энергия исходного состояния) при развитии ориентационных переходов (кривые 1–3 соответствуют ориентационным переходам а–с на рис. 1).

ствия системы

$$W_0 = \sum_i \sum_k (W_{ik} - W'_{ik}) / (2p^2),$$

где

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

— энергия диполь-дипольного взаимодействия i -го и k -го диполей, а W'_{ik} — энергия взаимодействия между двумя диполями в исходном состоянии решетки. Кривые 1–3 относятся к фазовым переходам, показанным на рис. 1, а–с соответственно. Для численного анализа

принималось, что каждый ряд решетки составляет 40 диполей.

Из рисунка видно, что в случае ориентационных переходов с сонаправленной исходной ориентацией всех рядов (кривые 1 и 2, см. рис. 1, а, б) после непродолжительного начального переходного процесса (и до приближения фронта ориентационного перехода к краю системы) суммарный дипольный момент и энергия диполь-дипольного взаимодействия решетки уменьшаются по закону, близкому к линейному. Уменьшение суммарного дипольного момента происходит из-за последовательного изменения ориентации диполей одного из рядов на противоположное, в то время как два других ряда остаются сонаправленными. Таким образом, из рисунка следует, что скорость распространения ориентационного перехода, при котором меняется направление диполей среднего ряда (рис. 1, б), почти в 2 раза выше, чем при изменении направления диполей крайнего ряда (рис. 1, а). Энергия диполь-дипольного взаимодействия при возбуждении внешним полем ориентационного перехода вначале (в переходной период) резко возрастает, что говорит об устойчивости исходной конфигурации, а далее энергия падает до уровня, отвечающего конфигурации системы после реализации в ней ориентационного перехода.

В случае третьего из рассматриваемых ориентационных переходов (когда исходной является конфигурация с двумя соседними сонаправленными рядами, а конечной — конфигурация с сонаправленными крайними рядами — рис. 1, с) суммарный дипольный момент вначале уменьшается до нулевого значения (кривая 3 на рис. 2, а), а затем его амплитуда возрастает до исходного значения, определяемого числом диполей в ряду (данный этап на рисунке не показан). При этом зависимость от времени как дипольного момента системы, так и энергии взаимодействия (кривые 3) имеет интервалы относительно медленного изменения соответствующих значений, которые сменяются интервалами быстрого их изменения. Из рассматриваемых ориентационных переходов скорость распространения данного перехода, как видно из рисунка, является наименьшей.

Перекрестье дипольных решеток

Рассмотрим две перекрещивающиеся под прямым углом трехрядные решетки. В качестве исходного, как и ранее, примем конфигурацию с сонаправленными рядами диполей („горизонтальной“ решетки — вправо, „вертикальной“ — вверх). При возбуждении в одной из частей данной структуры (рис. 3, а) любого из рассмотренных ориентационных переходов его фронт доходит до перекрестья решеток, но не переходит через него — не распространяется далее. На рис. 3, б показано, как фронт возбужденного в „нижней“ части структуры ориентационного перехода, меняющего ориентацию среднего ряда решетки, дошел до перекрестья решеток (штриховая стрелка), но не продвинулся далее.

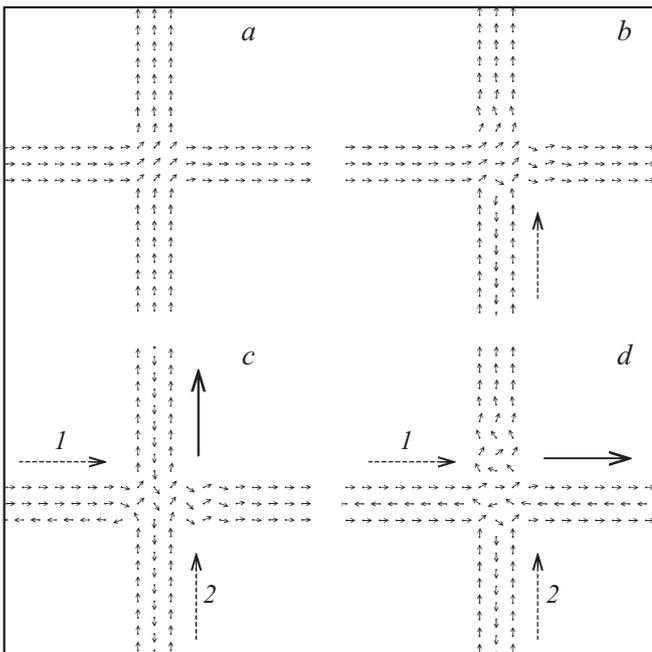


Рис. 3. Структура из двух перпендикулярно пересекающихся трехрядных решеток диполей; *a* — исходное состояние с сонаправленными рядами, *b* — структура с возбужденным в „нижней“ части ориентационным переходом — штриховой стрелкой показано направление фронта перехода, доходящего до перекрестья и не переходящего за него; *c* и *d* — ориентационный переход (движение его фронта указано непрерывной стрелкой), вызванный переходом 2 при предварительном возбуждении перехода 1.

Однако, если изменить состояние перекрестья (изменить ориентацию диполей), возникший в одной из частей фронт ориентационного перехода может перейти через него и продолжить распространяться в другой части системы.

Первым способом изменения конфигурации перекрестья является возбуждение в одной из частей системы ориентационного перехода. Таким образом, имеет место ситуация, когда реализованный ориентационный переход в одной части системы, позволяет ориентационному переходу, возбужденному в другой части системы, перейти через перекрестье и распространиться дальше. На рис. 3, *c, d* приведено два таких случая. На рис. 3, *c* в „левой“ части структуры реализован ориентационный переход, меняющий ориентацию крайнего (конкретно, нижнего) ряда решетки, в результате чего возбужденный в „нижней“ части структуры ориентационный переход проходит через перекрестье в „верхнюю“ часть структуры (непрерывная стрелка). Случай на рис. 3, *d* отличается от вышерассмотренного тем, что в „левой“ части структуры предварительно возбужден ориентационный переход, меняющий ориентацию среднего ряда. В результате ориентационный переход в „нижней“ части структуры распространяется и на „правую“ часть.

Следует обратить внимание, что некоторые из данных процессов не являются „коммутативными“, т.е. распро-

странение (или даже нераспространение) ориентационного перехода на другие части структуры зависит от последовательности возбуждения ориентационных переходов (на рис. 3, *c, d* последовательность ориентационных переходов соответствует нумерации 1 и 2). На рис. 4 приведен случай, когда от последовательности возбуждения ориентационных переходов зависит направление дальнейшего распространения фронта ориентационного перехода. Так, на рис. 4, *a, b* вначале в „левой“ части реализован ориентационный переход, меняющий ориентацию крайнего (верхнего) ряда, а затем — ориентационный переход в „нижней“ части, меняющий ориентацию среднего ряда. В результате ориентационный переход (аналогичный первому) распространился в „правую“ часть структуры. На рис. 4, *c, d* изменена последовательность возбуждения ориентационных переходов, в результате фронт ориентационного перехода, меняющего ориентацию среднего ряда, перешел через перекрестье в „верхнюю“ часть. Возвращаясь к рис. 3, отметим, что случай *d* аналогичен вышерассмотренному, т.е. направление распространения фронта ориентационного перехода после перекрестья зависит от последовательности возбуждения ориентационных переходов; случай же *c* является „коммутативным“ и развитие процесса не зависит от того, какой из ориентационных переходов (1 или 2) реализован раньше — в обоих случаях фронт ориентационного перехода распространяется в „верхнюю“ часть системы.

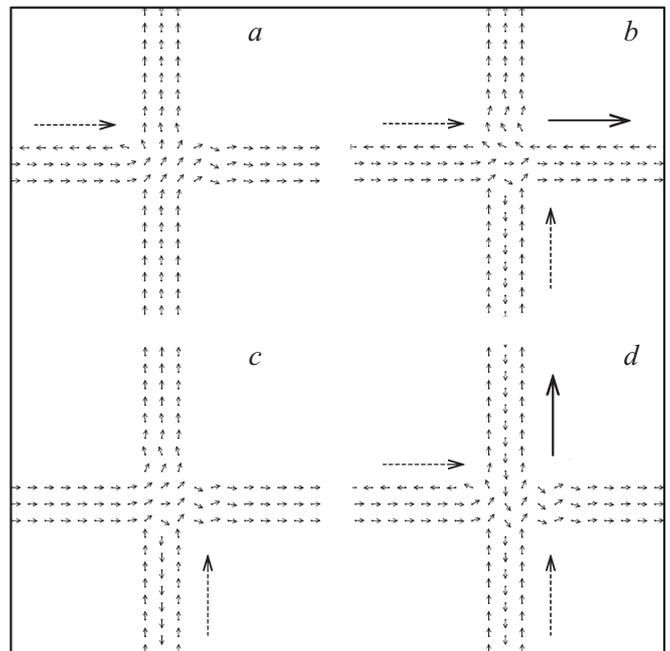


Рис. 4. „Некоммутативные“ свойства перекрестья решеток. Предварительное возбуждение ориентационных переходов в „левой“ (*a*) и „нижней“ (*c*) частях структуры и последующее возбуждение переходов в „нижней“ (*b*) и „левой“ (*c*) частях, приводящих к ориентационным переходам, чье направление фронтов показано непрерывной стрелкой.

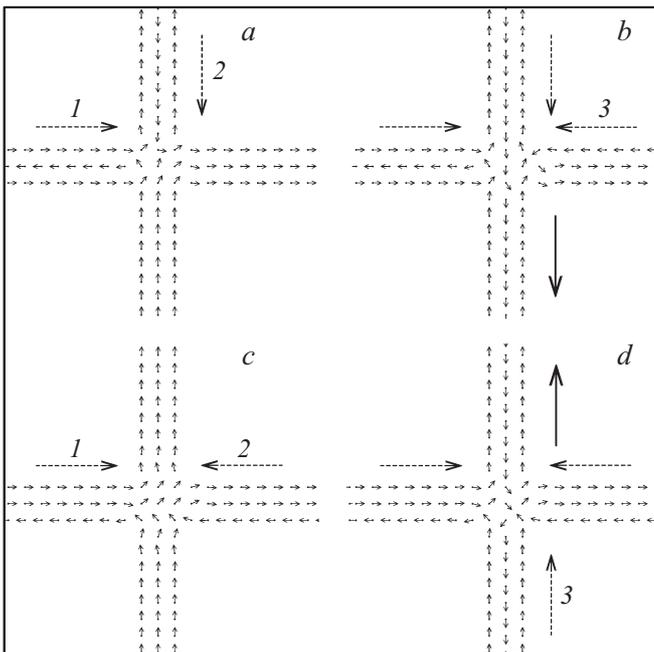


Рис. 5. Предварительное возбуждение двух ориентационных переходов (*a* и *c* — переходов 1 и 2 последовательно), не переходящих через перекрестье, и возбуждение перехода 3 (*b* и *d*), вызывающего ориентационный переход в „нижней“ (*b*) и „верхней“ (*d*) частях системы.

Имеют место также случаи, когда возбуждение ориентационных переходов в двух частях системы (т.е. с двух сторон относительно перекрестья решеток) не приводит к развитию ориентационного перехода в другой ее части; однако реализация перехода в третьей части системы приводит к возбуждению четвертой части системы и возникновению в ней ориентационного перехода. На рис. 5 приведены две конфигурации, когда ориентационный переход в одной из частей системы вызывает ориентационный переход в другой части системы только при условии, что предварительно осуществлены определенные ориентационные переходы в двух других ее частях. Так, на рис. 5, *a* показан случай, когда вначале в „верхней“ и „левой“ частях системы возбуждаются переходы, меняющие направление диполей среднего ряда, а впоследствии ориентационный переход, возбужденный „правой“ от перекрестья (меняющий направление диполей крайнего — верхнего — ряда; рис. 5, *b*), приводит к продвижению возбуждения через перекрестье и развитию ориентационного перехода в „нижней“ части структуры. На рис. 5, *c* в „левой“ и „правой“ частях предварительно реализуются переходы, переориентирующие крайний (нижний) ряд диполей, и возбужденный после этого „снизу“ от перекрестья переход (переориентирующий средний ряд диполей) распространяется через перекрестье „вверх“.

Вторым способом изменения перекрестья таким образом, чтобы фронт ориентационного перехода проходил через него, являются изменения с помощью внешнего

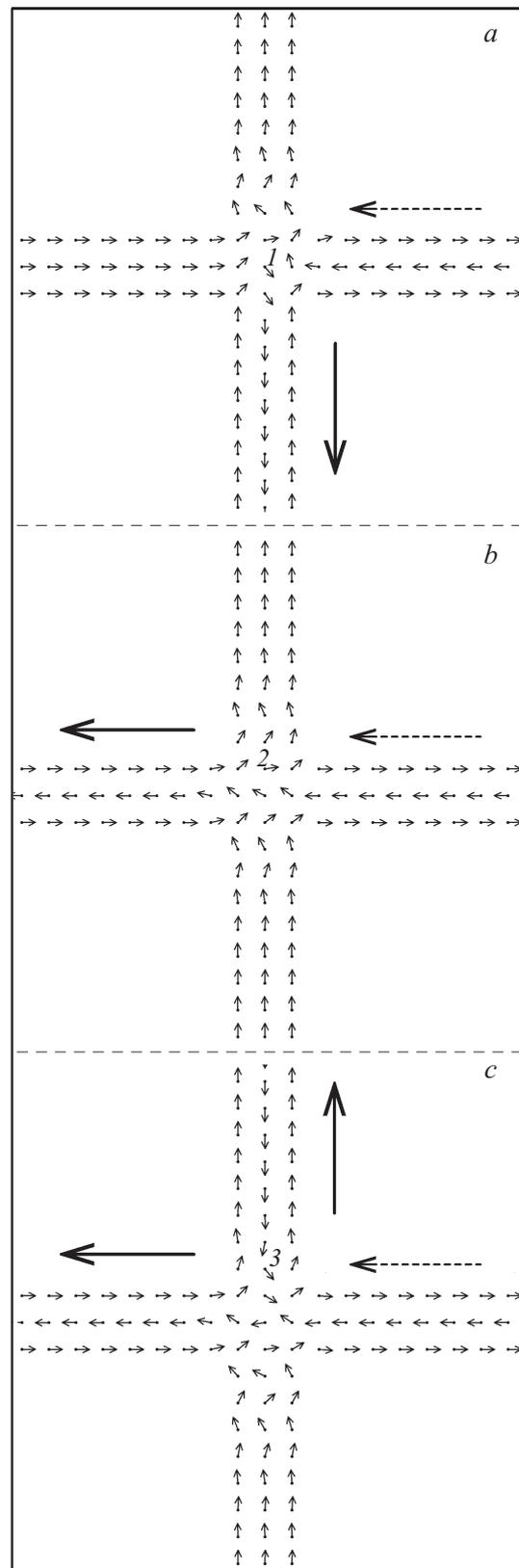


Рис. 6. Возбужденный ориентационный переход (направление фронта показано штриховой стрелкой) и вызванный им переход в другой части структуры (направление фронта показано непрерывной стрелкой) при воздействии внешним полем на входящие в область перекрестья диполи 1–3 (*a–c*).

поля ориентации определенных диполей перекрестья (или диполей вблизи него). На рис. 6 показаны три случая, когда воздействие на один диполь (отмеченный на рис. 6 цифрой 1, 2 или 3) приводит к тому, что ориентационный переход „справа“ от перекрестья переходит на другую сторону структуры. В случае *a* внешнее поле с $\phi = 5$ (здесь и далее), направленное под углом $-\pi/4$ (отсчитываемом от оси *y*, совпадающей с исходной ориентацией горизонтальной решетки), действует на диполь „1“. В результате фронт ориентационного перехода распространяется в „нижнюю“ часть структуры. В случае *b* внешнее поле под углом $-\pi/8$ действует на диполь „2“, что приводит к распространению фронта в „левую“ часть. В случае *c* на диполь „3“ поле действует под углом $-\pi/5$, и ориентационный переход охватывает две части структуры: „левую“ и „верхнюю“. При воздействии поля на диполь, расположенный в центре перекрестья под углом $-\pi/4$, ориентационный переход, возбужденный в „правой“ части структуры, распространяется на остальные части, и его фронт продвигается во все стороны от перекрестья. Подобным подбором направления внешнего поля и диполей, на которые оно воздействует, можно реализовать управление фронтом ориентационного перехода, возбужденного в одной из частей рассматриваемых структур.

Преимущество данного способа управления в том, что при использовании сложных систем со многими перекрестьями можно задавать путь продвижения фронта ориентационного перехода, в наименьшей степени изменяя конфигурацию остальной части сложной системы. Однако при этом до тех пор, пока ориентационный переход не достиг выбранного перекрестья, необходимо поддерживать требуемое воздействие внешним полем на определенный диполь из этого перекрестья. В первом из рассмотренных способов управления такого воздействия не требуется: в случае системы со многими перекрестьями можно заранее реализовать определенные ориентационные переходы, которые распространяются только на участки между двумя перекрестьями, но изменяют таким образом их конфигурацию, что становится возможным осуществление заданного продвижения фронта ориентационного перехода, возбужденного в другой части сложной структуры.

Заключение

Исследование трехрядных квадратных решеток диполей с сонаправленными рядами показало, что в них реализуются различные переходы, меняющие на противоположную ориентацию диполей одного из рядов. При этом в системе с перекрещиваемыми перпендикулярно решетками возбуждаемые с помощью внешнего поля ориентационные переходы распространяются только до области перекрестья, не переходя через нее. Изменение конфигурации области перекрестья позволяет возбужденному в одной из частей системы ориентационному переходу проходить через перекрестье в другую часть

системы. Первым способом изменения конфигурации области перекрестья является предварительная реализация ориентационного перехода с одной из сторон перекрестья, который не проходит через него, но создает условия для прохода фронта ориентационного перехода, возбужденного в другой части системы. Вторым способом управления ориентационным переходом является воздействие с помощью внешнего поля на определенные диполи из области перекрестья, в результате чего меняется их ориентация и возникают условия для распространения ориентационного перехода в другую часть системы.

Ориентационный переход, достигший области перекрестья, и переход, прошедший через него, в зависимости от состояния диполей перекрестья могут быть как одинаковыми, так различными, т.е. переориентирующими различные ряды дипольной решетки. Может меняться также направление продвижения фронта ориентационного перехода: переход, возбужденный в одной из частей системы, после перекрестья в одних случаях распространяется вдоль той же трехрядной решетки, в других случаях переходит на другую решетку и продолжает распространяться в перпендикулярном относительно исходного направлении. При воздействии внешним полем на определенные диполи перекрестья обнаружены также случаи, когда после перекрестья фронт ориентационного перехода распространяется сразу в двух или трех направлениях. При управлении областью перекрестья за счет предварительного возбуждения ориентационных переходов может проявляться свойство „некоммутативности“: направление распространения фронта ориентационного перехода после перекрестья или сама реализация данного распространения зависит от последовательности возбуждения двух ориентационных переходов.

Таким образом, перекрестье можно рассматривать как элемент управления, который в зависимости от своего состояния реализует следующие действия: не пропускает фронт ориентационного перехода, пропускает ориентационный переход без изменений, изменяет ориентационный переход — переход, возбужденный с одной стороны от перекрестья, и возникший с другой стороны оказываются различными, изменяет направление распространения ориентационного перехода, реализует „ветвление“ ориентационного перехода — после перекрестья фронт перехода распространяется в нескольких направлениях структуры, перекрестье может также проявлять „некоммутативные“ свойства, так как его конфигурация зависит от последовательности реализации с разных сторон от него двух ориентационных переходов. На основе полученных результатов, справедливых для различных систем с диполь-дипольным взаимодействием, при использовании сложных структур с комплексом подобных перекрестий дипольных решеток могут осуществляться эффективное управление фронтом ориентационного перехода в дипольных структурах и проектирование модулей обработки информации.

Работа выполнена при поддержке министерства образования и науки РФ в рамках „Программы госзадания“.

Список литературы

- [1] *Skomski R.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. R841–R896.
- [2] *Галкин А.Ю., Иванов Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83. Вып. 9. С. 450–454.
- [3] *Гусев С.А., Ноздрин Ю.Н., Сапожников М.В., Фраерман А.А.* // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 331–333.
- [4] *Billas I.M.L., Becker J.A., Chatelain A., de Heer W.A.* // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. N 24. P. 4067–4070.
- [5] *Губин С.П., Кокиаров Ю.А.* // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 11. P. 1287–1304.
- [6] *Каретникова И.Р., Нефедов И.М., Сапожников М.В., Фраерман А.А., Шерешевский И.А.* // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 2030–2034.
- [7] *Шутый А.М.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 14–21.
- [8] *Губин С.П., Кокиаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю.* // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [9] *Лисовский Ф.В., Поляков О.П.* // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73. Вып. 9. С. 546–550.
- [10] *Шутый А.М.* // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. Вып. 5. С. 1009–1010.
- [11] *Шутый А.М.* // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. Вып. 2. С. 277–286.
- [12] *Шутый А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 9. С. 601–606.