

СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В РЕШЕТКАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ

В.С.Герасимчук, Ю.И.Горобец, К. Deville Kavelin[†]*

*Донбасский инженерно-строительный институт
339023 Макеевка, Украина*

** Донецкий государственный университет
340055 Донецк, Украина*

*† Faculte des Sciences, Universite Paris XII
94010 Creteil Cedex, France*

Поступила в редакцию 3 марта 1994 г.

Представлено теоретическое обоснование возможности трансформации плотноупакованной гексагональной решетки цилиндрических магнитных доменов (ЦМД), имеющих одинаковые диаметры, в решетку ЦМД с доменами разного диаметра в нулевом поле смещения при понижении температуры. Определены условия существования и трансформации последней в решетку ЦМД, подобную кристаллической решетке графита.

Как известно [1-3], совокупность цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) благодаря дипольным силам отталкивания может образовывать упорядоченную периодическую структуру типа двумерной решетки. Предполагается, что ЦМД, формирующие подобную, и как правило, плотноупакованную гексагональную решетку, имеют одинаковые диаметры. Имеются, однако, свидетельства [4], что в определенном температурном интервале в нулевом поле смещения в решетке ЦМД могут сосуществовать домены двух разных диаметров. Домены меньшего диаметра располагаются в центре, а большего диаметра - в узлах гексагональной ячейки. В результате домены меньшего диаметра образуют свою гексагональную решетку. С понижением температуры решетка доменов меньшего диаметра коллапсирует и существует только решетка доменов большего диаметра. Эта последняя имеет структуру типа кристаллической решетки графита и является устойчивой в определенном температурном интервале [4].

Эффект избирательного коллапса доменов в решетке одинаковых ЦМД известен [3]. Однако возможность существования и границы стабильности решетки ЦМД типа кристаллической решетки графита ранее не исследовались и не обсуждались.

Рассмотрим ситуацию, приближенную к эксперименту [4]. Пусть безграничная в направлениях x и y пластина ЦМД-содержащего материала имеет толщину h и ось легкого намагничивания, перпендикулярную плоскости пленки. Выберем элементарную прямоугольную ячейку с периодами $a\rho^2$ и $a\rho$ вдоль осей x и y , соответственно ($\rho = \sqrt{3}$ - численный параметр гексагональной решетки). В элементарной ячейке имеется шесть ЦМД: четыре домена диаметром d_1 и два домена диаметром d_2 . В результате интересующая нас составная гексагональная решетка ЦМД оказывается сформированной из "вложенных" друг в друга двух решеток. Первая, с доменами диаметром d_1 , подобна кристаллической решетке графита с периодом, равным a . Вторая, с доменами диаметром d_2 , является гексагональной и имеет период $a\rho$. Таким

образом, домены диаметром d_2 располагаются в центре, а диаметром d_1 – в узлах составной гексагональной решетки. Полная энергия такой решетки ЦМД включает поверхностную энергию доменных стенок, магнитостатическую энергию решеток ЦМД с доменами диаметрами d_1 и d_2 и энергию магнитодипольного взаимодействия между всеми доменами

$$E = 2\pi M^2 - (2\pi M)^2 \frac{2}{3p} \left(\frac{h}{a}\right)^2 V + (4\pi M)^2 \frac{k_3}{3p} \left(\frac{h}{a}\right)^5 Q, \quad (1)$$

$$V = [2I(x_1) + I(x_2)] - \frac{l}{h}(2x_1 + x_2), \quad (2)$$

$$Q = (1 + \alpha)x_1^4 + 2(1 - \alpha)x_1^2x_2^2 + \alpha x_2^4. \quad (3)$$

Здесь: $\alpha = (3p)^{-1}$, $x_i = d_i/h$, $k_3 \approx 0,172$ – постоянная дипольного приближения в теории решеток ЦМД, M – намагниченность насыщения, l – характеристическая длина магнитного материала, $I(x)$ – функция стабильности Тила [5].

Определим условия равновесия и устойчивости составной решетки. Из условия

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2)$$

получаем систему уравнений

$$\frac{l}{h} - F(x_1) + \frac{q}{2}[(1 + \alpha)x_1^3 + (1 - \alpha)x_1x_2^2] = 0, \quad (4)$$

$$\frac{l}{h} - F(x_2) + q[\alpha x_2^3 + (1 - \alpha)x_2x_1^2] = 0, \quad (5)$$

где $q = 8k_3(h/a)^3$, $F(x)$ – функция стабильности [5]. Решения этой системы должны удовлетворять условиям устойчивости

$$\left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_1^2}\right) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_2^2}\right) - \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_1 \partial x_2}\right)^2 > 0, \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x_1^2} > 0. \quad (6)$$

Соотношения (4)–(6) служат обобщением соответствующих условий для решетки с одинаковыми ЦМД. Действительно, полагая здесь $x_1 = x_2 = x$, найдем, что система сводится к уравнению

$$\frac{l}{h} - F(x) + qx^3 = 0, \quad (7)$$

совпадающему с аналогичным уравнением работы [3] при $H = 0$, а неравенства (6) принимают вид

$$(F'(x) - 3\alpha qx^2)(F'(x) - 3qx^2) > 0, \quad (8)$$

$$F'(x) - (2 + \alpha)qx^2 > 0,$$

где

$$F'(x) = \frac{d}{dx} F(x).$$

Из условия потери устойчивости определим критические значения диаметров ЦМД. Используя аппроксимацию функции $F(x)$ [6]

$$F(x) = \frac{x}{1 + 0,726x},$$

найдем решения уравнений

$$F'(x_j)_c = 3\alpha_j q(x_j)_c^2, \quad \alpha_j = (1, \alpha). \quad (9)$$

Первое из них $(x_0)_c$ связано с коллапсом решетки ЦМД, имеющей одинаковые диаметры доменов [1-3], и в дальнейшем интересует нас лишь в качестве иллюстрации ко второму решению. Второе решение $(x_1)_c$ определяет точку потери устойчивости решетки, то есть критическое значение диаметра ЦМД, при котором гексагональная решетка с доменами одинакового диаметра трансформируется в решетку с доменами разного диаметра:

$$(x_1)_c = b \left[\left(1 + \frac{2}{b} (3\alpha q)^{-1/2} \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (x_1)_c > (x_0)_c, \quad (10)$$

где $b = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,726} \right)$.

Принимая значения $a = 20,7$ мкм, $h = 8,7$ мкм, определим критические размеры доменов:

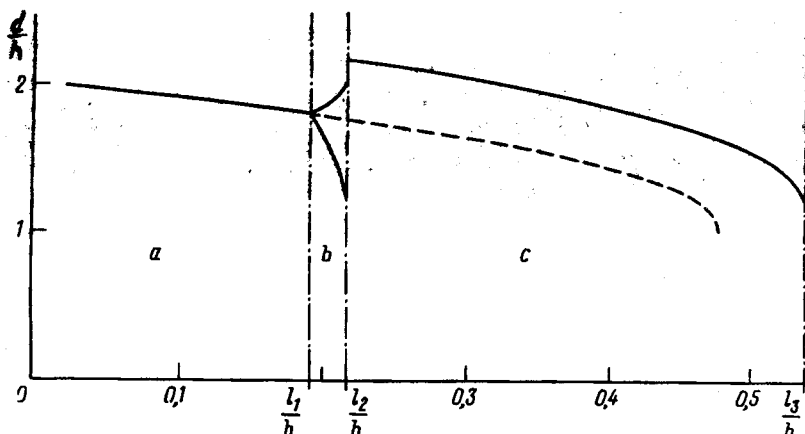
$$\begin{aligned} (x_0)_c &\cong 1,03, & (l_0)_c &\cong 0,48h, \\ (x_1)_c &\cong 1,79, & (l_1)_c &\cong 0,19h. \end{aligned}$$

Численное решение системы (4)-(5), описывающее зависимость $x = x(l/h)$, с учетом условий устойчивости (6) приведено на рисунке. Сплошные линии описывают поведение решетки ЦМД с изменением температуры и могут служить обоснованием экспериментальных результатов [4]¹⁾. Действительно, в области $l < (l_1)_c$ существует стандартная гексагональная решетка с доменами одинакового диаметра. При $l = (l_1)_c$ происходит структурный фазовый переход к решетке с доменами разных диаметров. Анализ решения системы показывает, что размеры доменов диаметром d_2 , расположенные в центре гексагональной ячейки, при дальнейшем возрастании l (понижении температуры) уменьшаются. Домены же диаметром d_1 , находящиеся в узлах ячейки, увеличиваются. При достижении критического значения $l = (l_2)_c \cong 0,22h$ домены диаметром d_2 коллапсируют, а домены диаметром d_1 скачком увеличивают свои размеры. Далее существует только решетка доменов диаметром d_1 :

$$\begin{aligned} \frac{l}{h} - F(x_1) + \frac{q}{2}(1 + \alpha)x_1^3 &= 0, \\ F'(x_1) - \frac{3}{2}(1 + \alpha)qx_1^2 &> 0, \end{aligned} \quad (11)$$

подобная кристаллической решетке графита. Наконец, при некотором значении $l = (l_3)_c \cong 0,54h$ наступает коллапс и этой решетки. Причем, диаметр коллапса ЦМД в этой решетке больше, нежели соответствующий диаметр ЦМД в гексагональной решетке с одинаковыми доменами.

¹⁾Заметим, что в работе [4] определение характеристической длины l больше общепринятого [1-3] в 4π раз.



Интервалы устойчивости решетки ЦМД относительно коллапса в зависимости от характеристической длины материала: *A* – с ЦМД одинакового диаметра; *B* – с ЦМД разного диаметра; *C* – типа кристаллической решетки графита

Приведенная на рисунке пунктирная кривая служит иллюстрацией отличия исследуемой составной решетки с разными доменами от стандартной решетки с одинаковыми ЦМД. Существующие теоретические построения [1–3] описывают именно эту кривую. Представленная на рисунке зависимость $z = z(l/h)$ сохраняется с изменением периода решетки a . При этом большим значениям a соответствуют большие размеры доменов и, соответственно, большие их критические диаметры.

При сравнении полученных результатов с экспериментальными, следует иметь в виду, что эксперимент [4] не фиксирует критических точек начала трансформации стандартной решетки ЦМД в составную с доменами разного диаметра или составной решетки в решетку ЦМД типа кристаллической решетки графита. Например, точка потери устойчивости решетки ЦМД с доменами одинакового диаметра $(z_1)_c$ отождествляется с ситуацией, когда решетка с доменами разного диаметра заполняет большую часть объема первоначальной стандартной решетки ЦМД.

Авторы признательны И.А.Мельничуку за обсуждение экспериментальных результатов и Г.В.Кирейко за помощь в проведении численных расчетов.

1. J.A.Cape and G.W.Lehman, J. Appl. Phys. **42**, 5732 (1971).
2. W.F.Druyvesteyn and J.W.F.Dorleijn, Philips Res. Rep. **26**, 28 (1971).
3. В.Г.Баряхтар, Ю.И.Горобец. Цилиндрические магнитные домены и их решетки. Киев: Наук. Думка, 1988.
4. Yu.Gorobets, I.Melnichuk, and Yu.Pimenov, JMMM **115**, 204 (1992).
5. A.A.Thiele, J. Appl. Phys. **41**, 1139 (1970).
6. Т.О'Делл. Магнитные домены высокой подвижности, М.: Мир, 1978 [Т.Н.О'Делл. Magnetic bubbles, Bristol: The Macmillan Press Ltd. 1974].
7. C.Kooy and U.Enz, Philips Res. Rep. **15**, 7 (1960).