

НОВЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ И СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

А.К.Звездин, С.Н.Уточкин

Институт общей физики РАН

117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 февраля 1993 г.

Теоретически исследованы спин-переориентационные фазовые переходы в анизотропных ферромагнитных сверхрешетках. В пределе бесконечного числа слоев для случая намагничивания вдоль трудной оси найдены выражения для критических линий фазовых переходов второго рода и построена фазовая диаграмма в координатах $\mu - h$, где μ - относительный магнитный момент единичной ячейки сверхрешетки, а h - приведенное внешнее поле. Показано, что внешняя поверхность оказывает существенное влияние на магнитное состояние сверхрешетки, приводя, в частности, к появлению новых поверхностных магнитных фаз. При этом важную роль играет также, является ли поверхностный слой изотропным или анизотропным.

Магнитные сверхрешетки, состоящие из чередующихся слоев различных магнитных материалов, - это новые искусственные магнитные материалы и поэтому представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес. Недавно в них были обнаружены новые свойства: эффект гигантского магнитосопротивления¹, спин-переориентационные явления и др. Хотя число экспериментальных работ по процессам намагничивания и спин-переориентационным фазовым переходам в сверхрешетках весьма велико (см., например,^{2,3}), существующие теоретические модели либо оперируют с бесконечной средой, либо используют численные методы⁴ и поэтому не дают законченной картины поведения магнитной структуры сверхрешетки во внешнем магнитном поле. В частности, практически не исследовано влияние магнитной анизотропии (объемной и поверхностной) на магнитные фазовые диаграммы сверхрешеток. Существенного внимания заслуживает также роль внешней поверхности в процессах переориентации. Именно эти вопросы находятся в центре внимания данного сообщения.

Здесь мы приводим результаты расчетов, которые учитывают реальную геометрию сверхрешетки, при этом, как будет видно ниже, поверхностные слои могут существенно влиять на процесс намагничивания и магнитное состояние сверхрешетки.

Термодинамический потенциал (ТП) сверхрешетки, в которой одна компонента изотропна, а другая имеет одноосную анизотропию (например, Gd/Co), при низких температурах можно записать в виде

$$F = - \sum_{i=1}^{N/2+1} h \cos \vartheta_{2i-1} - \sum_{i=1}^{N/2} \frac{1}{\mu} h \cos \vartheta_{2i} + \sum_{i=1}^N \cos(\vartheta_i - \vartheta_{i+1}) + \sum_{i=1}^{N/2} \frac{K}{2} \cos^2 \vartheta_{2i}, \quad (1)$$

где безразмерные параметры μ , h , K есть:

$$\mu = d_1 M_1 / d_2 M_2, \quad h = d_1 H / \lambda M_2, \quad K = \tilde{K} / \lambda M_1 M_2.$$

Здесь d_1, d_2, M_1, M_2 – соответственно толщины магнитных слоев и модули намагниченностей атомных плоскостей компонент сверхрешетки, \tilde{K} – константа анизотропии второго порядка, $\lambda > 0$ пропорциональна интегралу обменного взаимодействия через поверхность раздела слоев, а выражение $\lambda M_1 M_2$ пропорционально энергии этого взаимодействия. Общее число слоев сверхрешетки, которую мы считаем безграничной пластиной, есть $N + 1$, полагая первый и последний слои одинаковыми, то есть N – четное (следует отметить, что это положение является существенным, в другом случае фазовая диаграмма изменится), ϑ_k – угол между направлением внешнего поля \mathbf{H} и намагниченностью k -го монослоя (композиционно-однородной части сверхрешетки), полагая, что поле направлено в плоскости сверхрешетки, хотя качественно результаты не изменятся и при наложении поля вдоль нормали к плоскости.

При записи (1) полагалось, что намагниченности монослоев "насыщены" и зависят лишь от температуры, а также то, что внутрислойные обменные взаимодействия значительно превосходят по величине взаимодействие через границу раздела, что позволяет считать намагниченность однородной внутри каждого монослоя.

ТП (1) описывает сверхрешетку, в которой поверхностный слой является изотропным. Здесь мы ограничимся случаем намагничивания вдоль трудной оси, то есть будем считать $K > 0$.

Нами получены точные (в рамках данной модели) условия устойчивости различных коллинеарных (намагниченности слоев коллинеарны \mathbf{H}) магнитных фаз, зависящие от параметров μ, h, K и от полного числа слоев $N + 1$. В этом случае удастся точно проанализировать условия положительной определенности матрицы вторых производных $A = \|\partial^2 F / \partial \vartheta_i \partial \vartheta_j\|$, получая два условия устойчивости⁵. При этом одно из условий соответствует устойчивости внутренних слоев сверхрешетки, приводя к выражениям, аналогичным выражениям для ферримагнетика, а другое учитывает особенности граничных слоев, которые являются слабо обменно-связанными. В данном кратком сообщении мы приводим результаты для случая, когда число слоев стремится к бесконечности, что отвечает приближению полубесконечной среды. Если игнорировать наличие внешней поверхности, то получаемые выражения оказываются подобными выражениям для ферримагнетиков (см., например,⁶).

Фазовая диаграмма в координатах $\mu = d_1 M_1 / d_2 M_2, h = d_1 H / \lambda M_2$ приведена на рис.1.

"Ферримагнитная" фаза ($\vartheta_i = 0$) устойчива при условиях

$$h > 2, \quad \mu < h(h - 2) / (h(K + 2) - 2K) \quad (2)$$

(линия AB) или, в размерных переменных,

$$H > 2\lambda M_2 / d_1,$$

$$1/d_2 M_2 < H(H - 2\lambda M_2 / d_1) / (H(\tilde{K} + 2\lambda M_1 M_2) - 2\tilde{K}\lambda M_2 / d_1). \quad (2a)$$

Для "ферримагнитной" фазы 1 ($\vartheta_1 = \vartheta_3 = \dots = 0, \vartheta_2 = \vartheta_4 = \dots = \Pi$), которая существует лишь при $K < 2$, имеем:

$$h > 2K / (2 - K), \quad \mu > h(h + 2) / (h(2 - K) - 2K) \quad (3)$$

(линия CD) или, в размерных переменных,

$$H > 2\lambda M_2 \tilde{K} / (d_1(2\lambda M_1 M_2 - \tilde{K})),$$

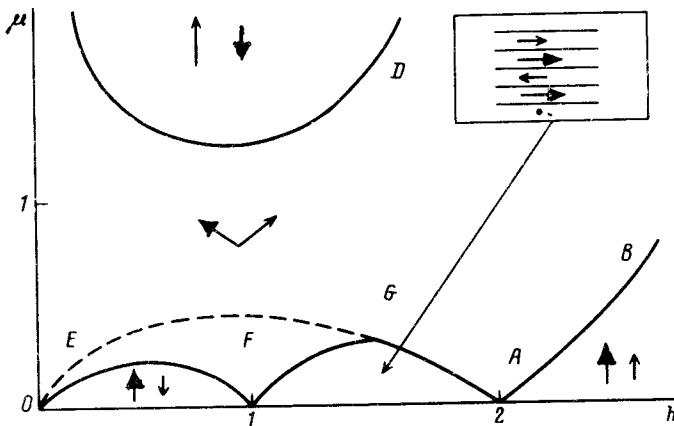


Рис.1. Фазовая диаграмма ферримагнитной сверхрешетки в пределе бесконечного числа слоев, поле $h \perp$ ОЛН (осям легкого намагничивания), на поверхности находится изотропный слой. Сплошные линии – линии фазовых переходов второго рода, пунктирная линия – линия перехода из поверхностно-угловой фазы в угловую. На рисунке схематически показана ориентация намагниченностей слоев по отношению к внешнему полю. Символ \uparrow – изображает изотропную компоненту, символ \uparrow – анизотропную. На вставке схематически показана ориентация намагниченностей слоев вблизи поверхности в поверхностно-переориентированной фазе

$$1/d_2 M_2 > H(H + 2\lambda M_2/d_1)/(H(2\lambda M_1 M_2 - \bar{K}) - 2\bar{K}\lambda M_2/d_1). \quad (3a)$$

Для "ферримагнитной" фазы 2 ($\vartheta_1 = \vartheta_3 = \dots = \Pi$, $\vartheta_2 = \vartheta_4 = \dots = 0$) условия устойчивости принимают вид

$$h < 1, \quad \mu < h(1-h)/(h + K(1-h)) \quad (4)$$

(линия EF) или

$$H < \lambda M_2/d_1,$$

$$1/d_2 M_2 < H((\lambda M_2/d_1) - H)/(H(\lambda M_1 M_2 - \bar{K}) + \bar{K}\lambda M_2/d_1). \quad (4a)$$

Наконец, существует "поверхностно-переориентированная" фаза ($\vartheta_1 = 0$, $\vartheta_3 = \vartheta_5 = \dots = \vartheta_{N-1} = \Pi$, $\vartheta_{N+1} = 0$, $\vartheta_2 = \vartheta_4 = \dots = 0$), то есть намагниченности граничных слоев ориентированы параллельно внешнему полю, а в глубине сверхрешетки сохраняется структура "ферримагнитной" фазы 2. Обнаружение этой фазы является существенно новым результатом и получено нами впервые. Условия устойчивости принимают вид

$$1 < h < 2, \quad \mu < h(h-1)(1-2(h-1)^2)/(h + K(h-1)(2-h)) \quad (5)$$

(линия FG) для $h < 3/2$ и

$$\mu < h(2-h)/(h(K+2) - 2h) \quad (6)$$

для $h > 3/2$ (линия GA).

В остальной области фазовой диаграммы существует угловая фаза, в которой моменты составляют различные углы с направлением поля H . Следует отметить, что в угловой фазе существует "подфаза", в которой максимальное отклонение моментов от коллинеарной ориентации наблюдается вблизи поверхности, стремясь к нулю при продвижении в глубь сверхрешетки. Область ее

(линия K_1G_1) для $h < h^*$ (см. рис 2) и

$$\mu < h(2 - K - h)/(2(h + K))$$

(линия K_1L_1) для $h > h^*$. В размерных переменных критерии могут быть получены подстановкой соответствующих значений для μ , h , K в формулы (7)–(10). При увеличении K происходит последовательное "подавление" "поверхностно-переориентированной" фазы (при $K > 1/2$), "ферромагнитной" фазы 2 (при $K > 1$), "поверхностно-угловой" подфазы, ограниченной сверху линией $E_1G_1L_1$ и снизу линиями K_1G_1 , E_1F_1 , и линией $\mu = 0$ (при $K > 2$).

Сравнивая рис.1 и рис.2, мы видим, что в случае, когда на поверхности лежит анизотропный слой, происходит "расталкивание" областей устойчивости "ферромагнитной" фазы, "ферромагнитной" фазы 2 и "поверхностно-переориентированной" фазы, и уширение области полей, в которых устойчивы угловые фазы; при этом в сильноанизотропном случае ($K > 2$) особенности подавляются, приводя к картине, аналогичной ферромагнетика (с перенормированной константой обменного взаимодействия между подрешетками).

Мы изучили магнитное состояние анизотропной сверхрешетки. Найдены критерии устойчивости и критические линии спин-переориентационных фазовых переходов второго рода для различных магнитных фаз. Найдены новые поверхностные фазы, показано, что в процессе намагничивания могут происходить два фазовых перехода второго рода. Отметим некоторое топологическое сходство рассмотренных фазовых диаграмм сверхрешеток с фазовой диаграммой объемного анизотропного ферромагнетика ⁶ в случае, когда поле направлено перпендикулярно легкой оси. Однако, когда спиновая переориентация начинается на поверхности, мы имеем существенные различия. Кроме того, в сверхрешетках мы имеем возможность в широких пределах изменять соотношение параметров обмена между слоями и величины эффективной анизотропии, и, таким образом, реализовать широкий спектр возможных спин-переориентационных фазовых переходов в сравнительно небольших магнитных полях. Интересные новые возможности возникают при учете реальной кристаллографической анизотропии между слоями. Это определяет предмет дальнейших исследований.

Авторы выражают глубокую признательность Российскому Фонду фундаментальных исследований за поддержку.

-
1. M.N.Baibich, J.M.Brato, A.Fert, et al., Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
 2. K.Sherifi, C.Dufour, G.Marchal, et al., JMMM **104-107**, 1833 (1992).
 3. M.Nawate, H.Kiriake, K.Doi, et al., JMMM **104-107**, 1861 (1992).
 4. R.E.Camley and D.R.Tilley, Phys. Rev. B **37**, 3413 (1988).
 5. А.К.Звездин, С.Н.Уточкин. Краткие сообщения по физике (в печати).
 6. К.П.Белов, А.К.Звездин, А.М.Кадомцева, Р.З.Легитин. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1979.
 7. J.G.LeFage and R.E.Camley, Phys. Rev. Lett. **65**, 1152 (1990).