

05

К вопросу о роли магнитоэлектрического взаимодействия в эффекте термического намагничивания мелкокристаллических сплавов высокоанизотропных магнетиков

© М.В. Плетнева, Ю.В. Толстобров, Н.А. Манаков

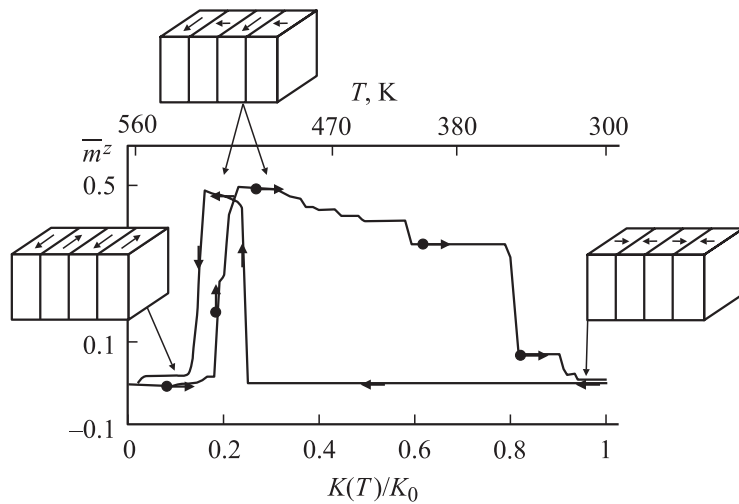
Бийский педагогический государственный университет им. В.М. Шукшина
E-mail: rektor@bigpi.biysk.ru

Поступило в Редакцию 19 апреля 2005 г.

На многослойной системе проведено микромагнитное моделирование эффекта термического намагничивания мелкокристаллических сплавов. Установлено, что для данной системы термическое намагничивание возникает в некотором промежутке температур, причем механизм эффекта отличается от механизма модели А.А. Зайцева–А.С. Лилеева.

Согласно модели А.А. Зайцева–А.С. Лилеева, эффект термического намагничивания объясняется наличием в размагниченном образце микрообъемов с различным значением констант анизотропии K [1,2]. Нагревание образца приводит к уменьшению констант и возрастанию роли магнитоэлектрического взаимодействия. В результате намагниченность микрообъемов с малыми значениями K ориентируется в направлении намагниченности соседних микрообъемов с большими K , что приводит к намагничиванию всего образца. Предполагается, что измененное в результате нагревания распределение намагниченности энергетически выгоднее исходного, поэтому после охлаждения намагниченность образца сохраняется. Существует и другое объяснение эффекта термического намагничивания. Так, на модели многослойной стохастической системы, состоящей из неограниченных слоев одноосного магнетика, было установлено, что эффект термического намагничивания возникает за счет обменного взаимодействия в отсутствие магнитоэлектрического поля [3].

В настоящей работе для проверки роли магнитоэлектрического взаимодействия рассматривались системы из 50 слоев, разделенных немагнитными прослойками, что исключало обменное взаимодействие между ними, а оси легкого намагничивания ориентировались ортогонально



Кривая изменения намагниченности системы из 50 слоев, толщина слоя $d = 2.685 \text{ nm}$, $\bar{m}^z = \int_0^1 m^z(z) dz$. Знаками „ \rightarrow “ и „ $\bullet \rightarrow$ “ показано нагревание и охлаждение системы соответственно.

слоям. На рисунке система показана упрощенно, состоящей из 4 слоев без прослоек. Декартовы координаты выбирались так, что координатная плоскость Oxy параллельна, а ось Oz ортогональна поверхности слоев. Предполагалось, что вектор намагниченности \mathbf{M} и параметры системы являются функциями от координаты z . Функционал свободной энергии G в данном случае представим в следующей безразмерной форме:

$$G = \int_0^1 \left\{ \frac{A}{M_S^2 L^2} \left[\left(\frac{\partial m^x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial m^y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial m^z}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{K}{M_S^2} (1 - (m^z)^2) + \frac{1}{2} m^z \cdot U' \right\} dz, \quad (1)$$

где в подынтегральном выражении записана сумма плотностей энергии обмена, энергии анизотропии и энергии системы в магнитостатическом поле; $M_S = |\mathbf{M}|$ — намагниченность насыщения;

$\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_S = (m^x, m^y, m^z)$ — единичный вектор намагниченности \mathbf{M} ; A — константа обмена; L — толщина многослойной системы; $z = 0$ и $z = 1$ — левая и правая (в единицах L) границы системы; K — константа анизотропии; U' — производная потенциала магнитостатического поля по координате z .

Потенциал магнитостатического поля для некоторого распределения намагниченности находился из решения задачи

$$U'' = \begin{cases} 4\pi \frac{\partial m^z}{\partial z} & \text{внутри слоев,} \\ 0 & \text{вне слоев;} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} + \frac{\partial U}{\partial(-\mathbf{n})} = -4\pi \mathbf{m} \cdot \mathbf{n} \quad \text{на границах слоев,} \quad (3)$$

где \mathbf{n} — единичная нормаль к поверхности слоя.

Нахождение равновесного распределения намагниченности заключалось в поиске некоторого локального минимума функционала свободной энергии (1) при условиях (2), (3). Предполагалось, что эволюция системы происходит в направлении наискорейшего понижения энергии. При численном решении задачи данное предположение приводит к применению градиентного спуска для дискретного аналога функционала (1) — функции конечного числа переменных.

Для исследования эффекта термического намагничивания первоначально в системе задавалось полностью размагниченное состояние (векторы намагниченности соседних слоев антипараллельны), а значения константы анизотропии последовательно составляли K и $K/2$. Изменение температуры выражалось через функциональную зависимость константы K от температуры, при этом другие параметры системы оставались неизменными. В ходе моделирования относительная величина константы анизотропии K/K_0 (где K_0 — значение K при температуре $T = 293$ К) уменьшалась от 1 до 0.01, а затем увеличивалась до исходного значения. Соответствующее изменение температуры в случае $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ показано на рисунке [4].

Проведенное исследование показало, что при повышении температуры намагниченность в системе возникает за счет поворота векторов намагниченности \mathbf{M} в слоях с малой анизотропией в плоскость слоев. Такой поворот соответствует понижению свободной энергии за счет значительного уменьшения магнитостатической энергии системы при

некотором росте энергии анизотропии (см. рисунок). При дальнейшем росте температуры векторы намагниченности \mathbf{M} ориентируются в плоскости и в высокоанизотропных слоях. В результате образец полностью размагничивается. При охлаждении процесс изменения ориентации векторов намагниченности происходит в обратной последовательности, но намагниченность в системе наблюдается в гораздо более широком интервале температур. В результате система приходит в исходное размагниченное состояние. Причина этого состоит в том, что состояние, в котором намагниченность в соседних слоях ориентирована в противоположных направлениях, энергетически выгоднее состояния с одинаковой ориентацией намагниченности. Таким образом, механизм ориентации намагниченности в слоях с малой анизотропией по направлению намагниченности высокоанизотропных слоев не реализуется. Результат, аналогичный показанному на рисунке, получен и для систем с толщиной слоев $d = 5.37$ и 10.74 nm.

Список литературы

- [1] *Зайцев А.А., Лилеев А.С., Сеин В.А.* // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. № 11. С. 82–84.
- [2] *Лившиц Б.Г., Лилеев А.С., Абальян Г.В.* и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1976. № 11. С. 131–134.
- [3] *Манаков Н.А., Плетнева М.В., Толстобров Ю.В.* // ФММ. 2005. Т. 99. № 1. С. 14–17.
- [4] *Higuchi A., Satoshi H.* // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25. P. 3555–3560.