

# Особенности перемагничивания трехслойных наноструктур

© К.А. Звездин

Институт общей физики Российской академии наук,  
117942 Москва, Россия

E-mail: zvezdin@hotmail.com

(Поступила в Редакцию 1 февраля 1999 г.  
В окончательной редакции 10 июня 1999 г.)

Проанализирован процесс перемагничивания трехслойной ультратонкой магнитной пленки. Показана существенная зависимость вида гистерезисных петель намагниченности и эффекта гигантского магнитосопротивления от соотношения магнитных параметров верхнего и нижнего магнитных слоев. Получены гистерезисные петли для характерных сочетаний параметров. Проанализирована зависимость вида гистерезисных петель от величины межслойного обмена. Построена фазовая диаграмма, определяющая области существования характерных петель гистерезиса при различных сочетаниях констант одноосной анизотропии и константы обмена  $J_1$ .

Магнитные свойства поверхности, тонких пленок и многослойных структур привлекают к себе большое внимание. В последние годы были обнаружены многие неожиданные и нетривиальные эффекты, связанные со свойствами магнитных поверхностей и интерфейсов: гигантское магнитосопротивление, значительная поверхностная анизотропия, отличие магнитных моментов на поверхности от их объемных значений, осциллирующее обменное взаимодействие между соседними магнитными слоями и большой биквадратный обмен в многослойных структурах [1–3]. Кроме несомненной фундаментальной значимости эти системы представляют большой прикладной интерес для конструирования магнитной памяти, сенсоров и т.д. [4,5]. Исследование процессов перемагничивания таких систем представляется важной задачей. Было обнаружено, что существовавшие ранее упрощенные модели перемагничивания не позволяют адекватно описывать процессы перемагничивания. Для более корректного описания этих процессов в настоящее время активно используется компьютерное моделирование [6,7]. В данной работе исследован процесс перемагничивания трехслойной наноструктуры (рис. 1) при различном сочетании параметров верхнего и нижнего магнитных слоев. Показано, что это соотношение существенно влияет на характер процесса перемагничивания структуры и, следовательно, на вид гистерезисных петель намагниченности и магнитосопротивления. Исследованная наноструктура часто называется спиновым переключателем (spin-valve).

## 1. Теоретическая модель трехслойной структуры и основные уравнения

Типичная трехслойная структура изображена на рис. 1. Предполагается, что толщина магнитных слоев мала по сравнению с длиной и шириной, так что изменением намагниченности вдоль толщины можно пренебречь. Поэтому распределение намагниченности зависит только от координат  $x$  и  $y$ . Ось  $z$  направлена по нормали к структу-

ре. Толщина немагнитного слоя (spacer) предполагается достаточно малой (1–5 nm), так что при исследовании необходимо принимать во внимание межслойное обменное взаимодействие. Исследование проводилось путем численного решения уравнения Ландау–Лифшица

$$\dot{\mathbf{M}} = \gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}^{eff}] - \frac{\alpha\gamma}{M_s} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}^{eff}]], \quad (1)$$

где  $\gamma$  — гиромангнитное отношение,  $\mathbf{M}$  — намагниченность,  $\alpha$  — безразмерная константа диссипации,  $\mathbf{H}^{eff}$  — эффективное поле, равное

$$\mathbf{H}^{eff}(\mathbf{r}) = -\frac{\delta F(\mathbf{r})}{\delta \mathbf{M}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_M(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_A(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_{in-exch}(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_{inter-exch}(\mathbf{r}),$$

где  $F$  — свободная энергия,  $\mathbf{H}_0$  — внешнее магнитное поле,  $\mathbf{H}_A$  — поле анизотропии,  $\mathbf{H}_{in-exch}$  и  $\mathbf{H}_{inter-exch}$  — поля внутрислойного и межслойного обмена соответственно.

Наиболее сложным для компьютерного моделирования является магнитостатическое взаимодействие

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{r}) = \sum_l \int_V \text{div} \mathbf{M}_l(\mathbf{r}_l) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\mathbf{r}_l,$$

где  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}'$  — координаты точек, между которыми вычисляется взаимодействие; суммирование производится по

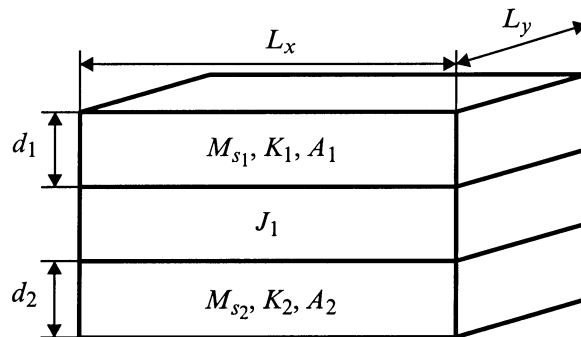
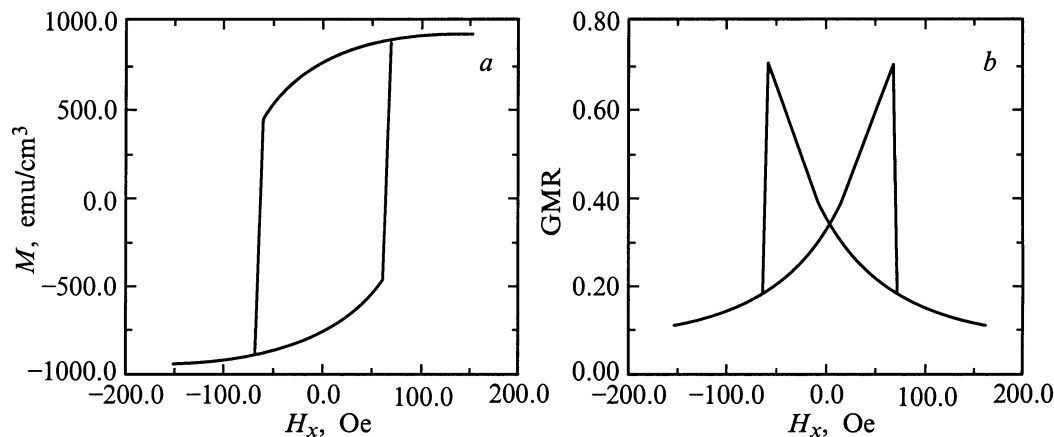


Рис. 1. Трехслойная spin-valve-структура.

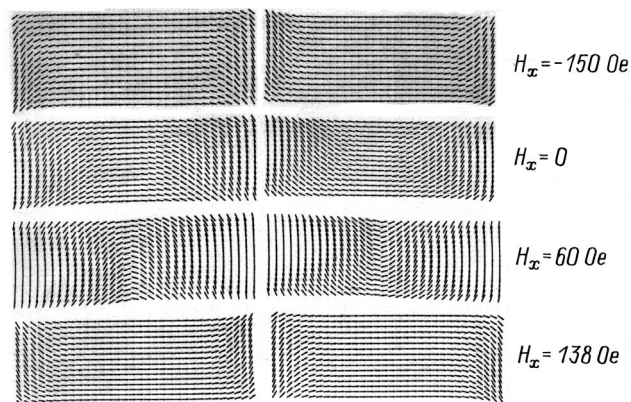


**Рис. 2.** Кривая гистерезиса намагниченности симметричной структуры, по оси абсцисс — магнитное поле, по оси ординат — средняя намагниченность структуры (а); кривая гистерезиса намагниченности, по оси абсцисс — магнитное поле, по оси ординат — величина эффекта гигантского магнитосопротивления (GMR) (b).

всем  $l$  слоям. Здесь следует отметить, что магнитостатическое поле зависит от всех трех координат  $(x, y, z)$ . Таким образом, необходимо вычислить это взаимодействие для всего объема  $V$  [8], что является очень трудоемкой вычислительной задачей, поэтому создание эффективных численных методов микромагнетизма является важной проблемой [6,7,9]. При моделировании предполагалось, как отмечено выше, что распределение вектора намагниченности  $\mathbf{M}(x, y, z)$  однородно по толщине каждого слоя, при этом вектор  $\mathbf{M}$  имеет  $z$ -составляющую. Подобную модель можно назвать квазитрехмерной.

## 2. Симметричная spin-valve-структура

Рассмотрим сначала симметричную spin-valve-структуру, т.е. структуру, состоящую из двух одинаковых магнитных слоев, разделенных немагнитной прослойкой. Исследования проводились при следующих параметрах: на рис. 2 приведены кривые гистерезиса намагниченности (рис. 2, а) и эффекта магнитного переключения



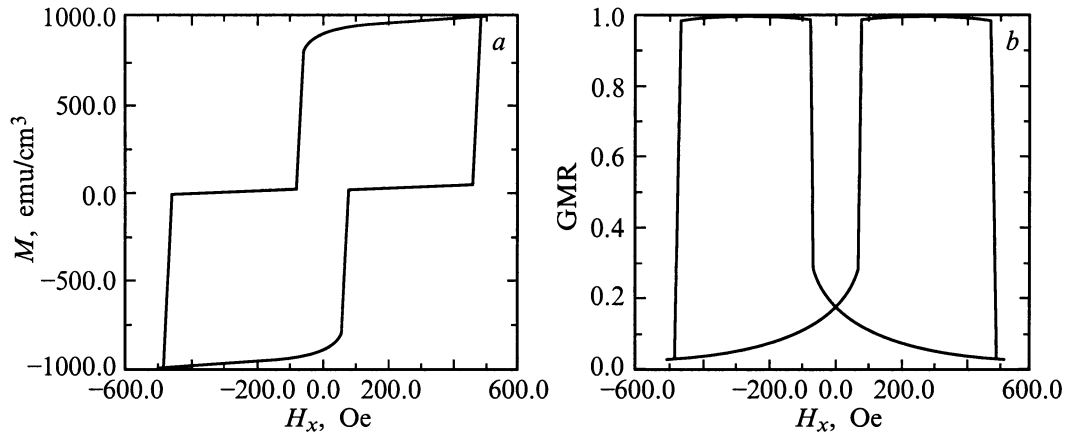
**Рис. 3.** Распределения намагниченности для характерных точек петли гистерезиса.

(рис. 2, b). На рис. 3 приведены распределения намагниченности, полученные для характерных значений внешнего поля. По указанным рисункам можно проследить синхронность процесса перемагничивания. Верхний и нижний магнитные слои переключаются одновременно, при одном значении внешнего магнитного поля. Механизм переключения аналогичен механизму переключения однослойной магнитной пластинки [9] — на краях элемента зарождаются области перемагничивания, которые при увеличении внешнего поля расширяются в глубину элемента с образованием 180-градусной стенки, после чего при достижении внешним полем критического значения происходит ”пробой” — быстрое перемагничивание центральных областей.

## 3. Несимметричные spin-valve-структуры

Рассмотрим более сложные несимметричные spin-valve-структуры, т.е. структуры, состоящие из слоев с разными магнитными и геометрическими параметрами. Как будет показано далее, различные соотношения параметров верхнего и нижнего слоев могут существенно влиять на вид гистерезисных петель и характер процесса перемагничивания. Рассмотрим три основных случая: (1)  $M_{s1}d_1 = M_{s2}d_2, K_1 > K_2$ ; (2)  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2, K_1 > K_2$  и (3)  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2, K_1 < K_2$ , где  $K_1$  и  $K_2$  — константы одноосной анизотропии верхнего и нижнего магнитных слоев. Ось анизотропии направлена по оси  $x$ .

3.1. Случай  $M_{s1}d_1 = M_{s2}d_2, K_1 > K_2$ . На рис. 4, а, b приведены кривые гистерезиса намагниченности и эффекта магнитного переключения, а также распределения намагниченности, полученные для характерных значений внешнего поля. Мы видим, что гистерезисная кривая намагниченности состоит из двух ступенек, соответствующих переключению магнитомягкого и магнито жесткого слоев (рис. 4, а).



**Рис. 4.** Кривая гистерезиса намагниченности (а) и эффекта гигантского магнитосопротивления (b) несимметричной структуры вида  $M_{s1}d_1 = M_{s2}d_2$ ,  $K_1 > K_2$ .

Кривая гистерезиса эффекта магнитного переключения показывает, что существует устойчивое антиферромагнитное распределение в определенном интервале внешнего магнитного поля (рис. 4, b). При моделировании задавались следующие магнитные параметры:  $K_1 = 1000 \text{ erg/cm}^3$ ,  $K_2 = 30\,000 \text{ erg/cm}^3$ ,  $M_s = 1000 \text{ emu/cm}^3$ ,  $d_1 = d_2 = 40 \text{ \AA}$ .

Из приведенных распределений намагниченности (рис. 5) видно, что перемагничивание магнитомягкого слоя протекает существенно более неоднородно, чем магнитожесткого. Намагниченность магнитожесткого слоя меняется скачкообразно, без сильного нарушения однородного распределения перед перемагничиванием. Магнитомягкий слой, напротив, перемагничивается существенно неоднородно, с постепенным расширением областей неоднородности с краев слоя к его центру. На кривой гистерезиса намагниченности это видно по "сглаженности" первого скачка и "угловатости" второго.

3.2. Случай  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2$ ,  $K_1 > K_2$ . На рис. 6, a, b приведены кривые гистерезиса намагниченности

(а) и эффекта магнитного переключения (b). В этом случае мы наблюдаем существенную неоднородность перемагничивания как магнитомягкого, так и магнитожесткого слоев. Мы видим, что оба скачка существенно сглажены. Кривая гистерезиса эффекта магнитного переключения показывает, что устойчивого антиферромагнитного распределения в этом случае нет (рис. 6, b). Гистерезисная кривая для подобной структуры экспериментально наблюдалась в работе [10].

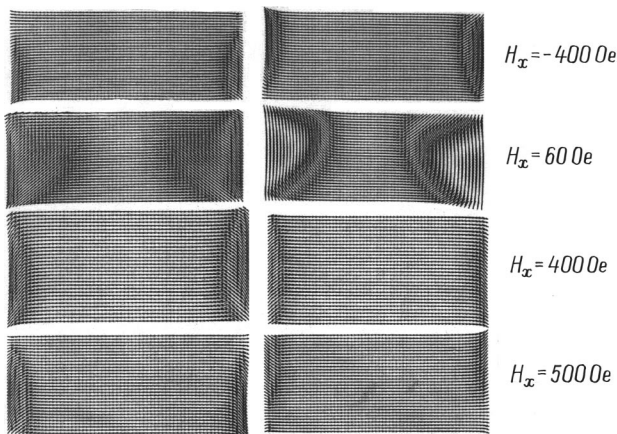
При моделировании мы задавали следующие магнитные параметры:  $K_1 = 1000 \text{ erg/cm}^3$ ,  $K_2 = 30\,000 \text{ erg/cm}^3$ ,  $M_{s1} = 1200 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_{s2} = 800 \text{ emu/cm}^3$ ,  $d_1 = d_2 = 40 \text{ \AA}$ .

3.3. Случай  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2$ ,  $K_1 < K_2$ . Для этого случая исследовано влияние соотношения величин константы одноосной анизотропии магнитожесткого слоя и константы межслойного антиферромагнитного обмена  $J_1$ . Получены четыре характерные петли гистерезиса, определяющие четыре различных характера перемагничивания (рис. 7). При моделировании задавались следующие магнитные параметры:  $M_{s1} = 1200 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_{s2} = 800 \text{ emu/cm}^3$ ,  $d_1 = d_2 = 40 \text{ \AA}$ .

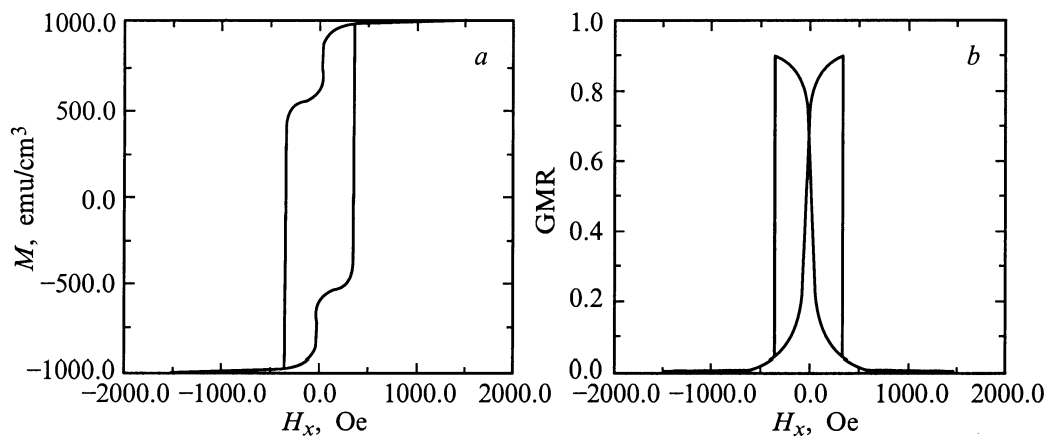
Также получена диаграмма, определяющая области существования этих типов перемагничивания в зависимости от соотношения величины анизотропии и межслойного обмена (рис. 8).

1) При слабом антиферромагнитном обмене гистерезисная кривая имеет вид (рис. 7, a). При определенном положительном значении внешнего поля перемагничивается магнитомягкий слой с большой остаточной намагниченностью, затем при дальнейшем увеличении внешнего поля перемагничивается магнитожесткий слой с меньшей остаточной намагниченностью.

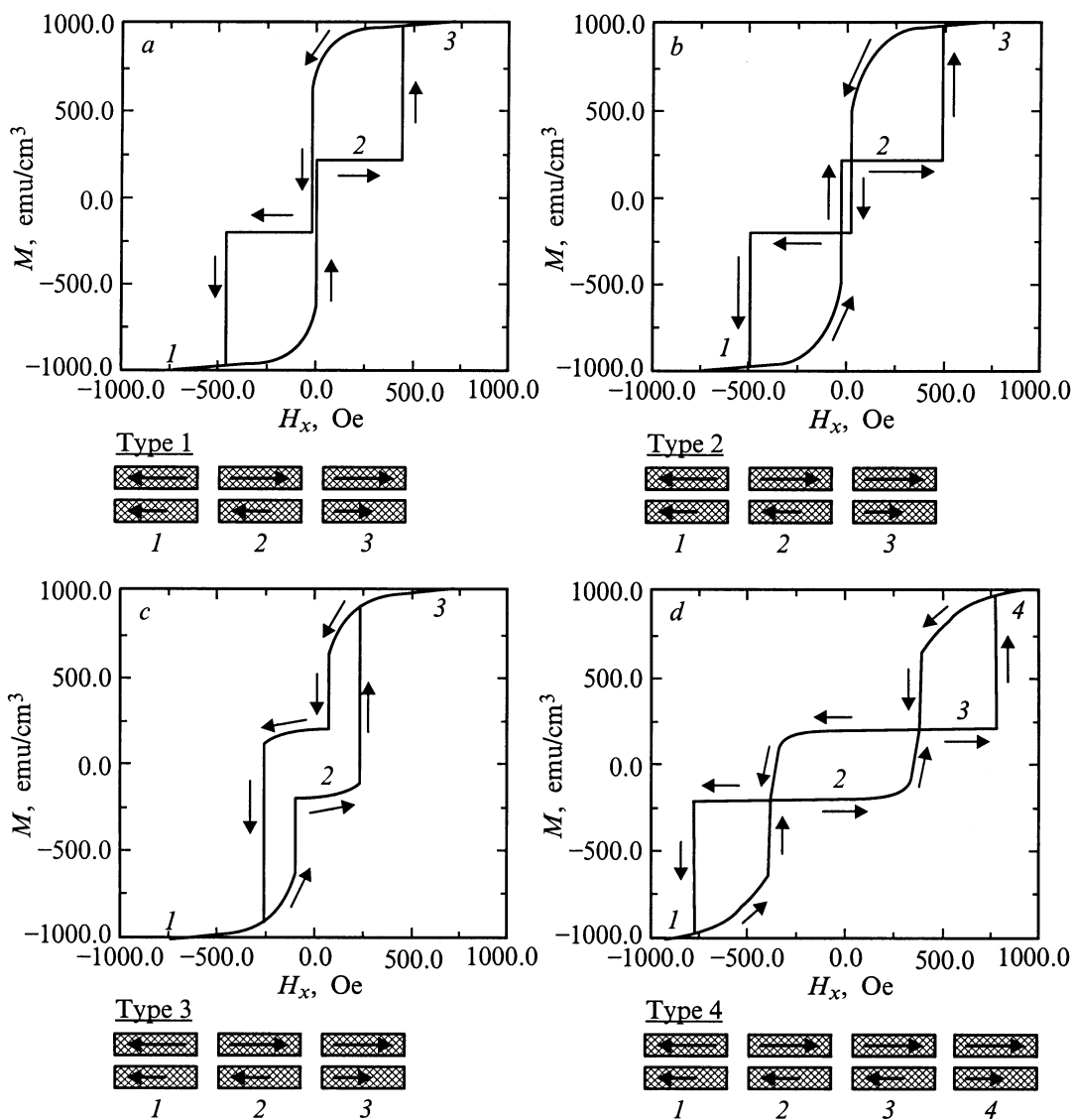
2) При увеличении межслойного обмена гистерезисная кривая принимает вид "тройной" петли (рис. 7, b). Особенностью данного случая является то, что структура переходит в состояние с намагниченностью, направленной против внешнего поля, т.е. из состояния с



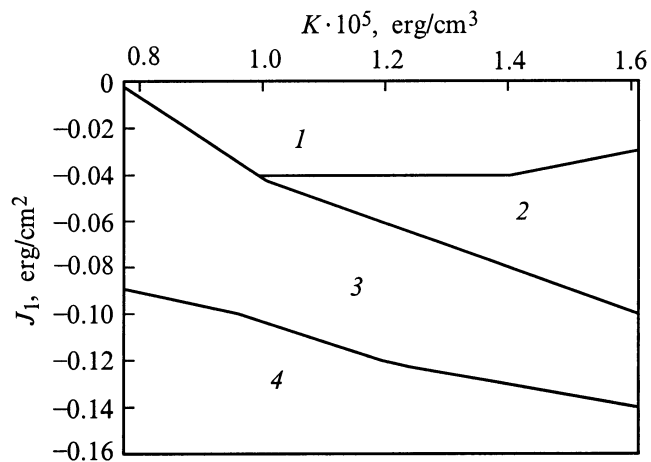
**Рис. 5.** Распределения намагниченности для характерных точек петли гистерезиса.



**Рис. 6.** Кривая гистерезиса намагниченности (a) и эффекта гигантского магнитосопротивления (b) несимметричной структуры вида  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2$ ,  $K_1 > K_2$ .



**Рис. 7.** Четыре характерные петли гистерезиса намагниченности для случая  $M_{s1}d_1 > M_{s2}d_2$ ,  $K_1 < K_2$  при различной величине константы антиферромагнитного обмена  $J_1$ . Схематически показана очередность переключения слоев.



**Рис. 8.** Диаграмма, определяющая области существования характерных петель гистерезиса в зависимости от константы анизотропии  $K$  и величины межслойного обмена.

отрицательной намагниченностью в состоянии с положительной намагниченностью при отрицательном внешнем магнитном поле. Это можно объяснить тем, что обменное поле со стороны магнито жесткого слоя превышает внешнее магнитное поле и поле анизотропии, препятствующие перемагничиванию. Это явление экспериментально наблюдалось в работе [11] (см. также [3]).

3) При дальнейшем увеличении антиферромагнитного межслойного обмена меняется очередность перемагничивания слоев, т.е. сначала перемагничивается слой с большей константой анизотропии, а потом магнитомягкий слой (рис. 7, *c*). Это можно объяснить тем, что поле обмена со стороны слоя с большей намагниченностью (и малой константой анизотропии) намного превосходит поле обмена со стороны слоя с малой намагниченностью (и большой константой анизотропии). При некоторой величине  $J_1$  это поле становится больше, чем внешнее поле и поле анизотропии, препятствующие перемагничиванию. В магнитомягком же слое обменное поле меньше, чем поля, препятствующие перемагниченности (так как действует оно со стороны слоя с малой намагниченностью).

4) И, наконец, при дальнейшем увеличении  $J_1$  гистерезисная кривая переходит в кривую, изображенную на рис. 7, *d*. Внешне эта кривая напоминает кривую для случая 2, однако процесс перемагничивания здесь совершенно иной. Сначала перемагничивается магнито жесткий слой, затем при увеличении внешнего поля перемагничивается магнитомягкий слой, а магнито жесткий перемагничивается еще раз, и, наконец, перемагничиваются оба слоя. В этом случае антиферромагнитный обмен настолько велик, что при перемагничивании слоя с большей намагниченностью он перемагничивает еще раз слой с малой намагниченностью.

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования получены петли гистерезиса для характерных

соотношений параметров магнитных слоев. Исследована зависимость характера процесса перемагничивания от величины межслойного обмена и соотношения констант анизотропии в магнитных слоях. Получена фазовая диаграмма, определяющая области существования характерных петель гистерезиса в зависимости от межслойного обмена и соотношения констант анизотропии.

## Список литературы

- [1] P. Gründberg, R. Shreiber, Y. Pang, M.B. Brodsky, H. Sowers. *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- [2] J.C. Slonczewski. *J. Appl. Phys.* **73**, 10, 5957 (1993).
- [3] В.В. Добровицкий, А.К. Звездин, А.Ф. Попков. *УФН.* **166**, 4, 439 (1996).
- [4] D.D. Tang, P.K. Wang, V.S. Speriosu, S. Le, K.K. Kung. *IEEE Trans. Magn.* **31**, 6, 3206 (1995).
- [5] L.V. Golubev, D.V. Kirin, A.Yu. Polozov, A.F. Popkov, V.G. Red'ko, N.V. Vorotnikova, K.A. Zvezdin. *Proceedings of ITP* **13**, 2, 9 (1997).
- [6] С.Г. Осипов. Моделирование микромагнитных структур. Докт. дис. МГУ (1993).
- [7] L. Greenhard, V.A. Rokhlin. *J. Comp. Phys.* **73**, 325 (1987).
- [8] W.F. Brown, jr. *Micromagnetics*. Interscience Publishers, Wiley, N.Y.-London (1963).
- [9] К.А. Звездин. Моделирование физических процессов в магнитных наноструктурах. Дипломная работа, МГУ (1997).
- [10] T. Zhu, J. Shi, K. Nordquist, S. Tehrani, M. Duram, E. Chen, H. Goronkin. *IEEE Trans. Magn.* **33**, 3601 (1997).
- [11] K. Takashi, H. Kurokawa, H. Fujimori. *Appl. Phys. Lett.* **63**, 11, 1585 (1993).