Моделирование процессов немонотонной магнитной релаксации мультислойной магнитной структуры

Льготина Дарья Александровна

Научный руководитель:
д.ф.-м.н, профессор П.В. Прудников

Кафедра теоретической физики

ОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. Ф.М. Достоевского

Актуальность

Одно из наиболее распространенных явлений спинтроники – эффект гигантского магнетосопротивления(ГМС)[1] в гетероструктурах, который используется для считывания и записи информации.

В настоящее время гетероструктуры, состоящие из ультратонких пленок находят широкое прикладное применение в нанотехнологиях:

- сверхчувствительные сенсоры;
- ячейки MRAM;
- элементы квантовых компьютеров.

[1] A.Fert et al., Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // Phys. Rev. Lett. 1988. V.61. P.2472–247.

Важным свойством многослойных тонкоплёночных систем является магнитная релаксация[2] – процесс установления термодинамического равновесия в системе магнитных моментов вещества.

Релаксация магнитного момента в ферромагнетике происходит в два этапа:

- за счёт относительно сильного обменного взаимодействия устанавливается равновесное значение абсолютной величины магнитного момента спина;
- за счёт слабого спин-орбитального взаимодействия магнитный момент медленно ориентируется вдоль оси лёгкого намагничивания.

Исследование процессов релаксации является важным потому, что скорость переключения между стабильными состояниями приборов спинтроники[3] определяет их быстродействие.

[2] R.B. Morgunov, G.L. Lvova, JETP Letters, 2018, p. 137–141.

[3] P. Gargiani, Nature Communications, 2017, V. 8. p. 699.

Цель

Проводится исследование неравновесных процессов релаксации мультислойной структуры из низкотемпературного начального состояния при разных начальных состояниях:

- направление намагниченности: параллельное и антипараллельное;
- изменении начального внешнего поля h_o.

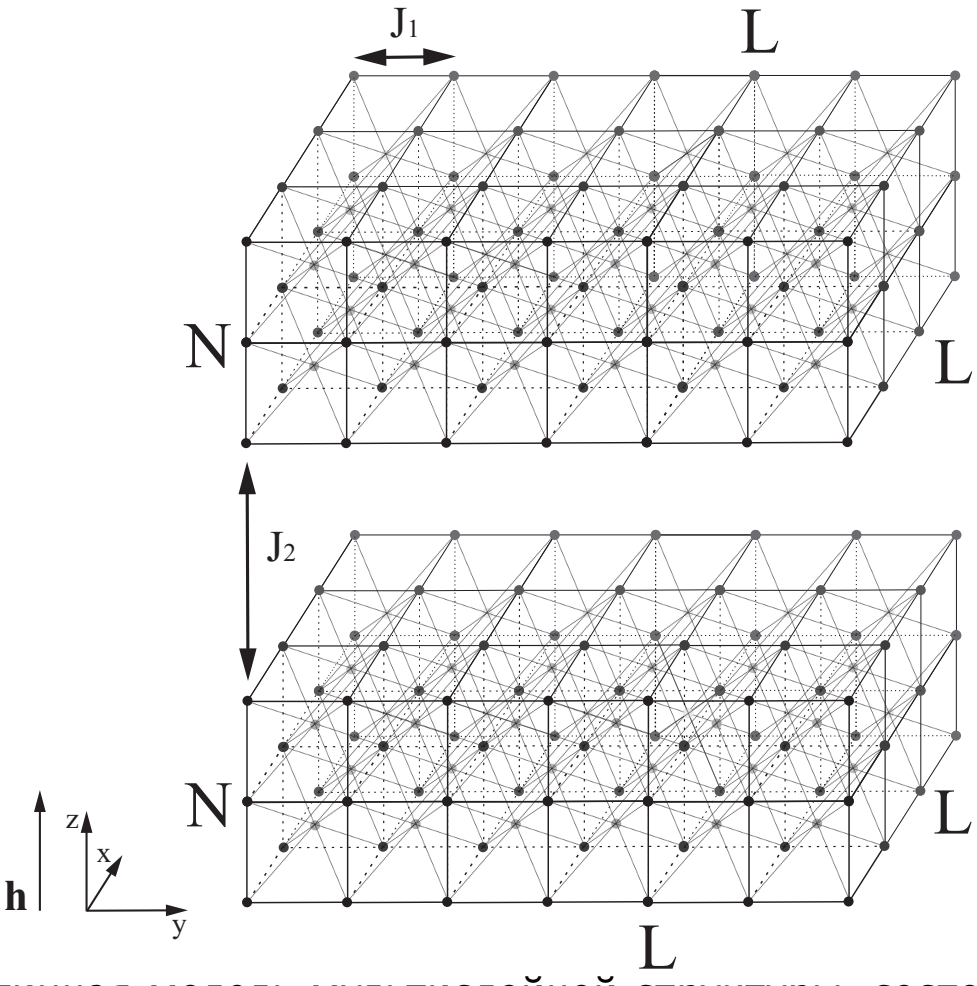

Рис. 1: Схематичная модель мультислойной структуры, состоящей из двух ферромагнитных пленок, разделенных пленкой немагнитного металла: размеры ферромагнитных пленок: N – толщина, L –линейный размер. Обменные интегралы: $J_1 > 0$ – определяет взаимодействие между спинами внутри пленки; $J_2 < 0$ – определяет взаимодействие спинов между пленками.

Гамильтониан

Для описания магнитных фазовых превращений использовался гамильтониан:

$$H = -J_1 \sum_{i,j \in N_S} [\vec{S}_i \vec{S}_j - \Delta(N) S_i^x S_j^x S_i^y S_j^y] - J_2 \sum_{\alpha \in N_1, \beta \in N_2} [\vec{S}_\alpha \vec{S}_\beta - \Delta(N) S_i^x S_j^x S_i^y S_j^y] -$$

$$-A \sum_{i \in N_S} (S_i^z)^2 - h_z \sum_{i \in N_S} S_i^z, \qquad (1)$$

где $\vec{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ – трёхмерный спин в i-ом узле всей системы;
$N_S = 2 \times NL^2$ – полное число спинов в системе;
α, β – индексы ферромагнитных пленок N_1 и N_2 соответственно;
A — константа, характеризующая одноионную анизотропию, создаваемую подложкой вдоль оси перпендикулярной плоскости монослоя;
$\Delta(N)$ – параметр анизотропии.

Условия моделирования

Рассматривалась мультислойная структура из ферромагнитных пленок со следующими характеристиками: толщинами $N_1 = 4$ML; $N_2 = 2$ML; линейным размером $L = 32$.

Значение обменного интеграла, определяющего взаимодействие между пленками, $J_2 = -0.2\ J_1$.

Значение обменного интеграла, определяющего взаимодействие соседних спинов внутри пленки, бралось $J_1/k_B T = 1$.

Параметры гамильтониана (1) выбраны таким образом, чтобы соответствовать структуре из экспериментальной работы[4].

[4] T. Fache, H. S. Tarazona, Phys. Rev., 2018, V. 98. p. 064410.

Определение T_c методом поведения проекции m_z при изменении h

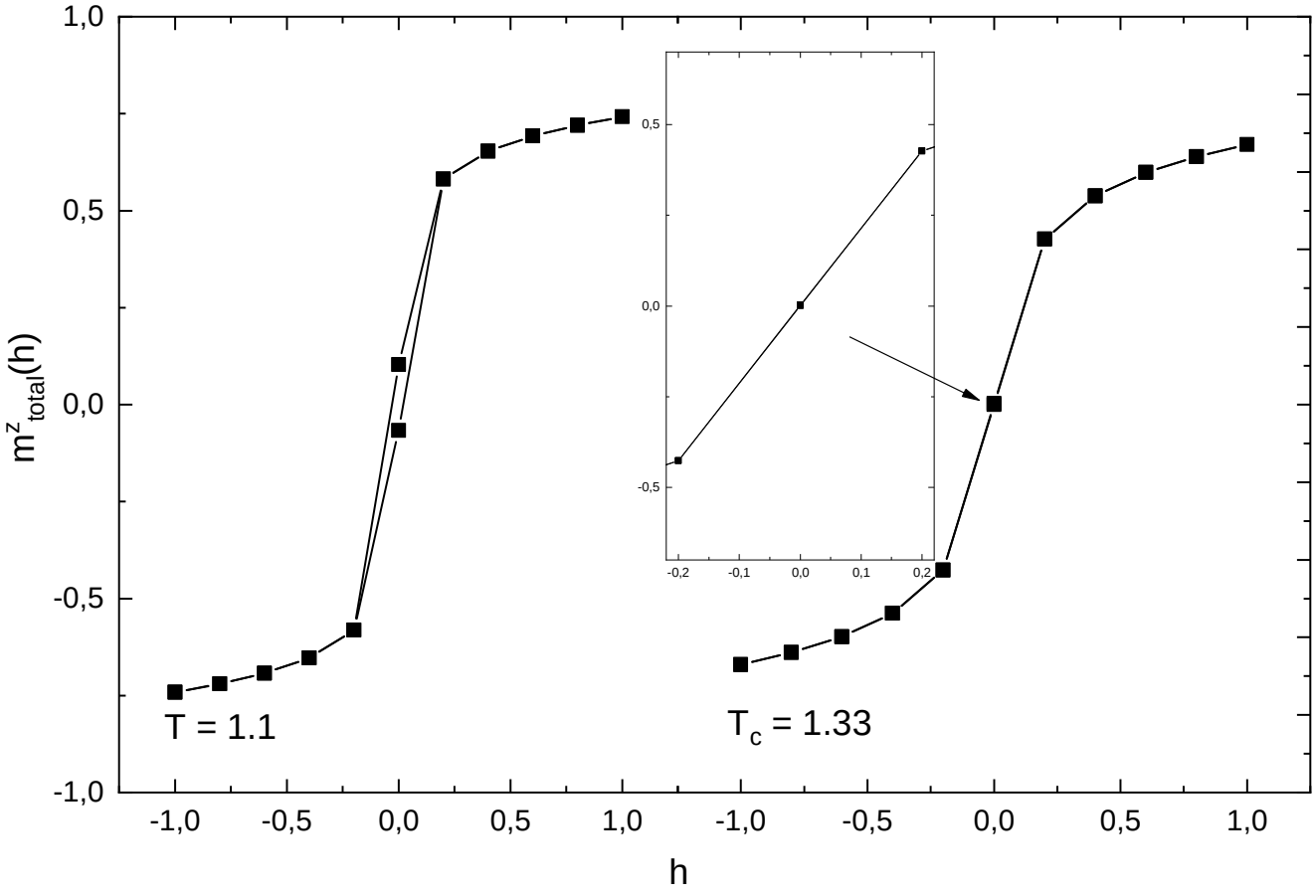

Рис. 2: Петли гистерезиса при разных T в диапазоне поля: h = [-1; 1]. На вставке показан интервал приближения: h = [-0.2; 0.2] для $T_c = 1.33$.

Значения T_c мультислойных магнитных структур для разных значениях A: $T_c(A = 1.0) = 1.63$; $T_c(A = 2.0) = 1.83$.

Петли гистерезиса

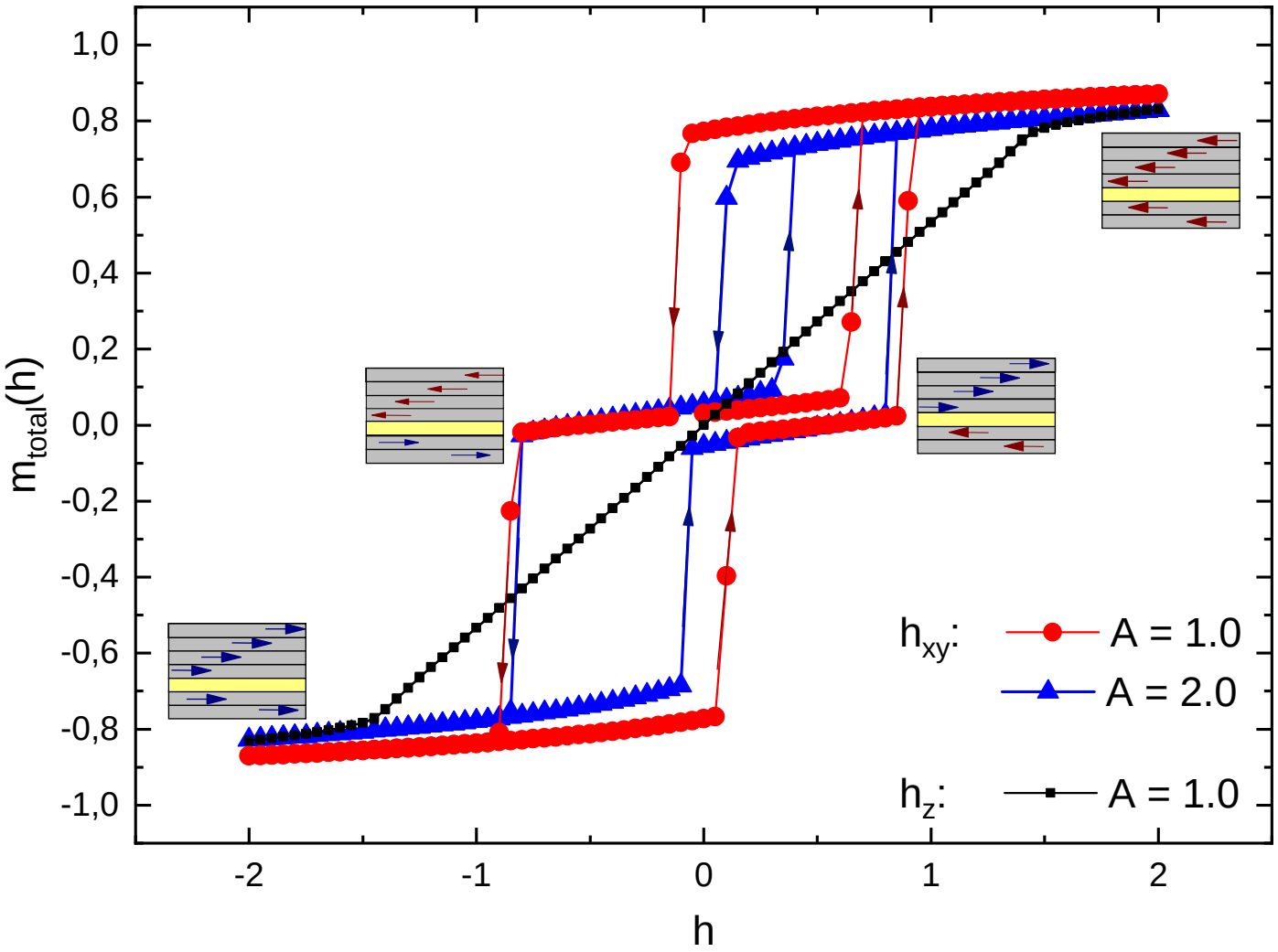

Рис. 3: Петли гистерезиса, с типом анизотропии "легкая плоскость" $\Delta(N_1) = 0.56$; $\Delta(N_2) = 0.78$ при $T_c/2$.

Релаксации намагниченности для мультислойных структур

Расчет проекции намагниченности пленок по оси z:

$$m_n^z(t) = \left\langle \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} S_i(t) \right\rangle, \tag{2}$$

где n – номер пленки;
<...> обозначают статистическое усреднение по реализации начального состояния.

Модуль полной намагниченности ферромагнитной пленки задается формулой:

$$m_n = \left\langle \frac{1}{N_s} \left[\left(\sum_{i=1}^{N_s} S_i^x \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_s} S_i^y \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_s} S_i^z \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\rangle. \tag{3}$$

Полная намагниченность системы определяется как: $\vec{m}_{total} = |\vec{m}_1 + \vec{m}_2|$.

Классификация релаксаций намагниченности

В работе[5] были описаны и классифицированы немонотонные релаксации намагниченности.

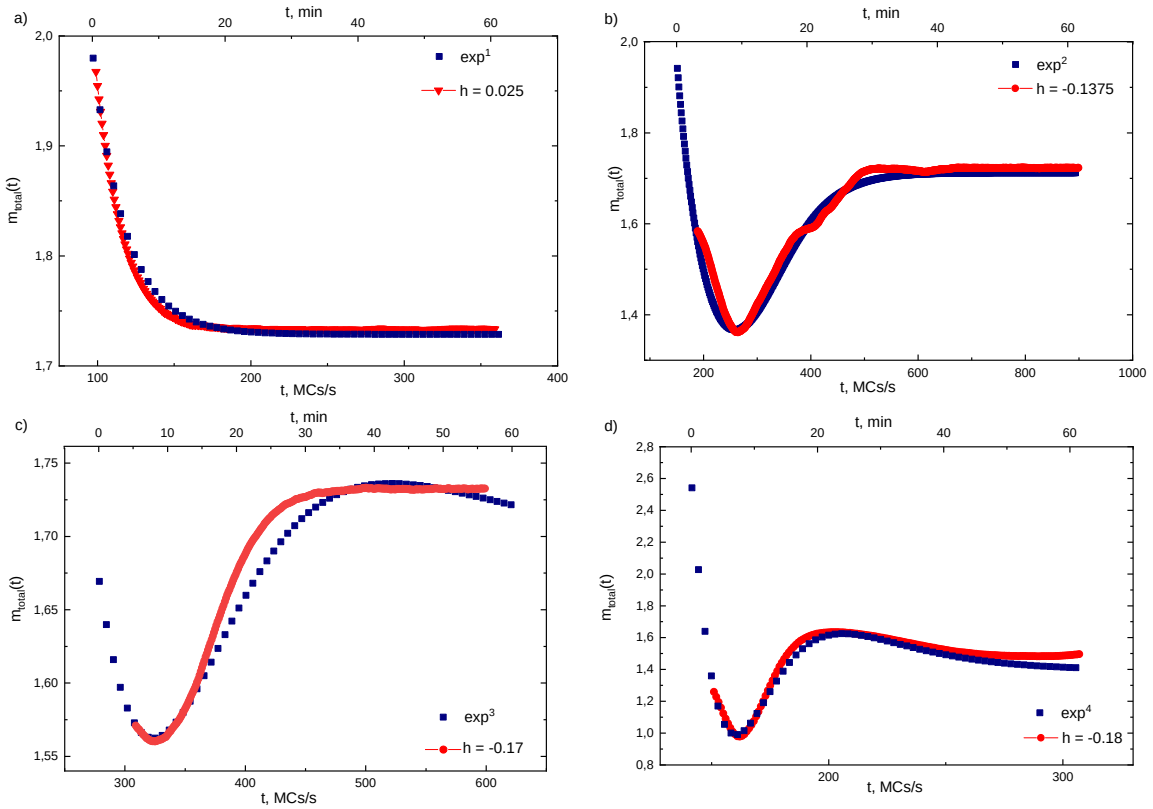

Рис. 4: Типы релаксации для структуры при $\Delta = 0.68$ с начальными условиями: $T_o = 0.0$; $h_o = 0.2$, после релаксации $T = 0.6$. Кривые exp^{1-4} соответствуют экспериментальным данным

[5] R.B. Morgunov, A.I. Bezverkhnii, Superlatties and Microstructures, 2020, V. 142. p. 106509.

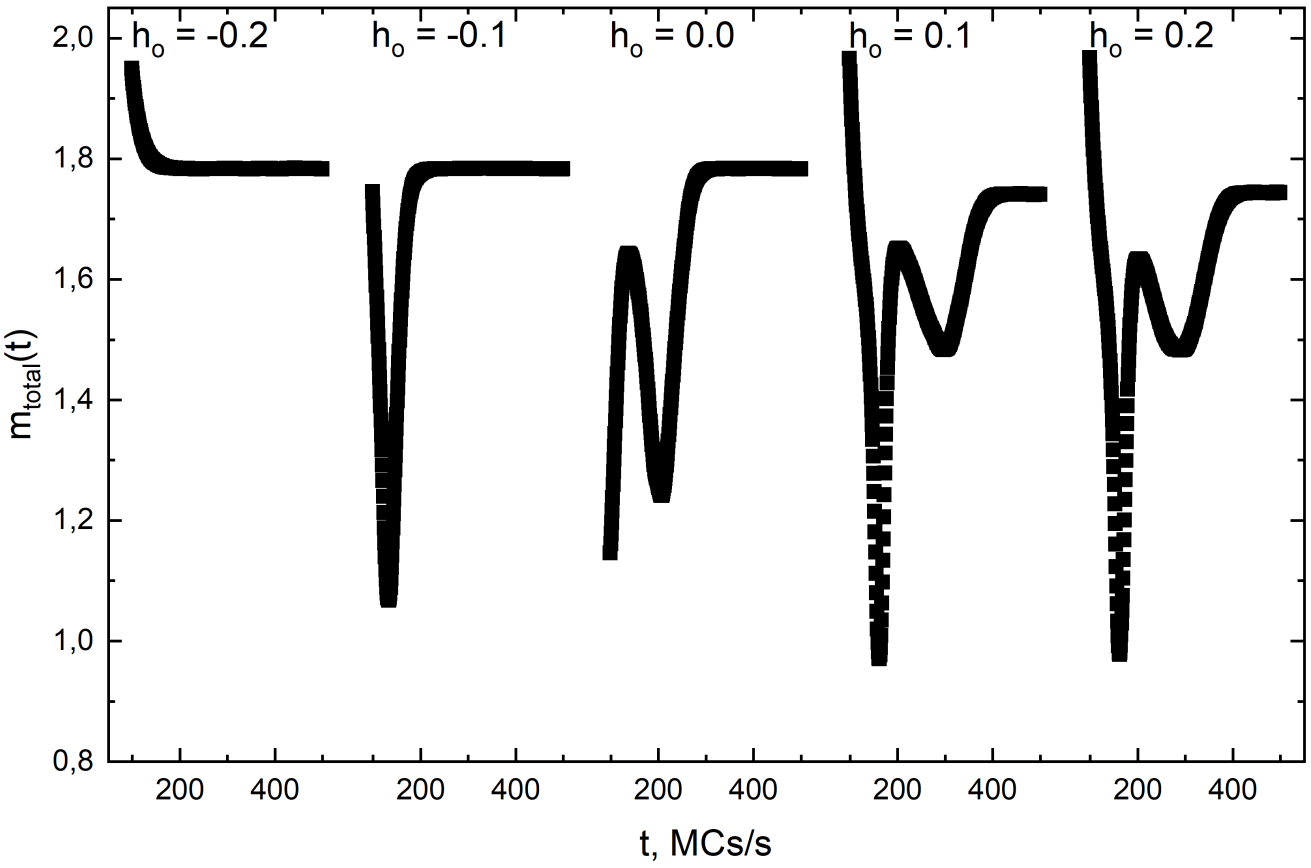

Рис. 5: Наборы релаксаций m_{total} при начальном паралельном положений намагниченности пленок при значении $h = 0.18$ с изменением начального поля в диапазоне: $h_0 = [-0.2; 0.2]$

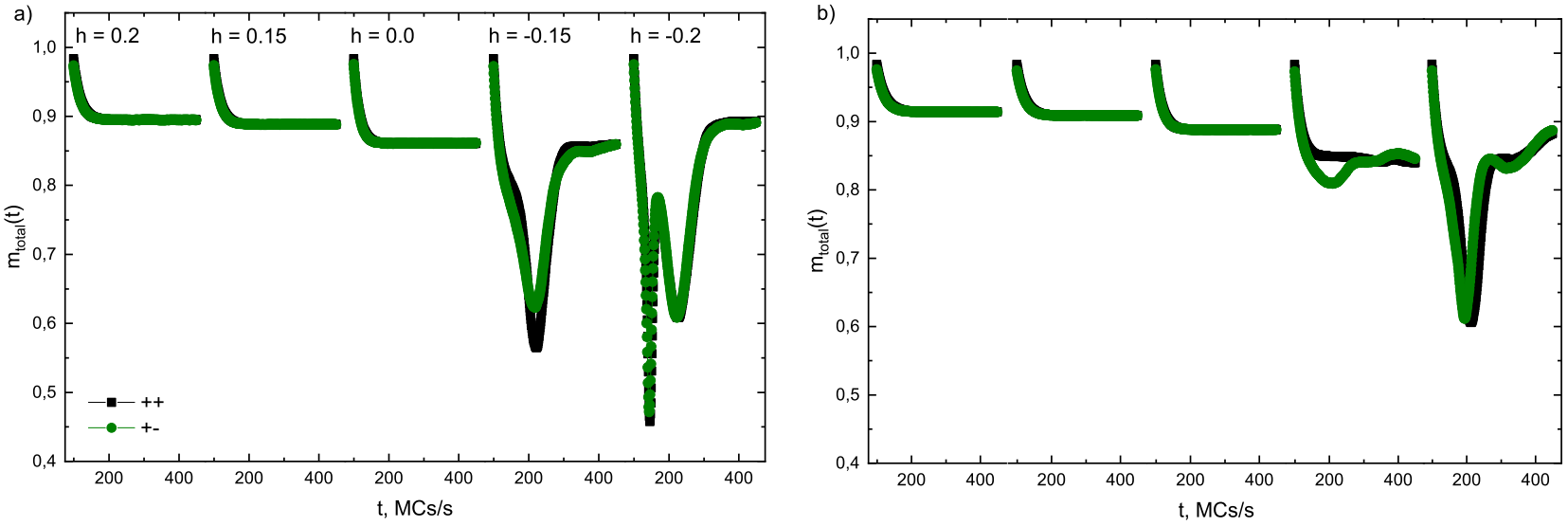

Рис. 6: Наборы релаксаций m_{total} с начальными условиями: $T_o = 0.0$; $h_o = 0.2$ для разных начальных положений намагниченности: паралельном и антипаралельном с температурой после релаксации: a) T = 0.6; b) T = 0.5 для значений поля $h = 0.2$; 0.15; 0.0; -0.15; -0.2

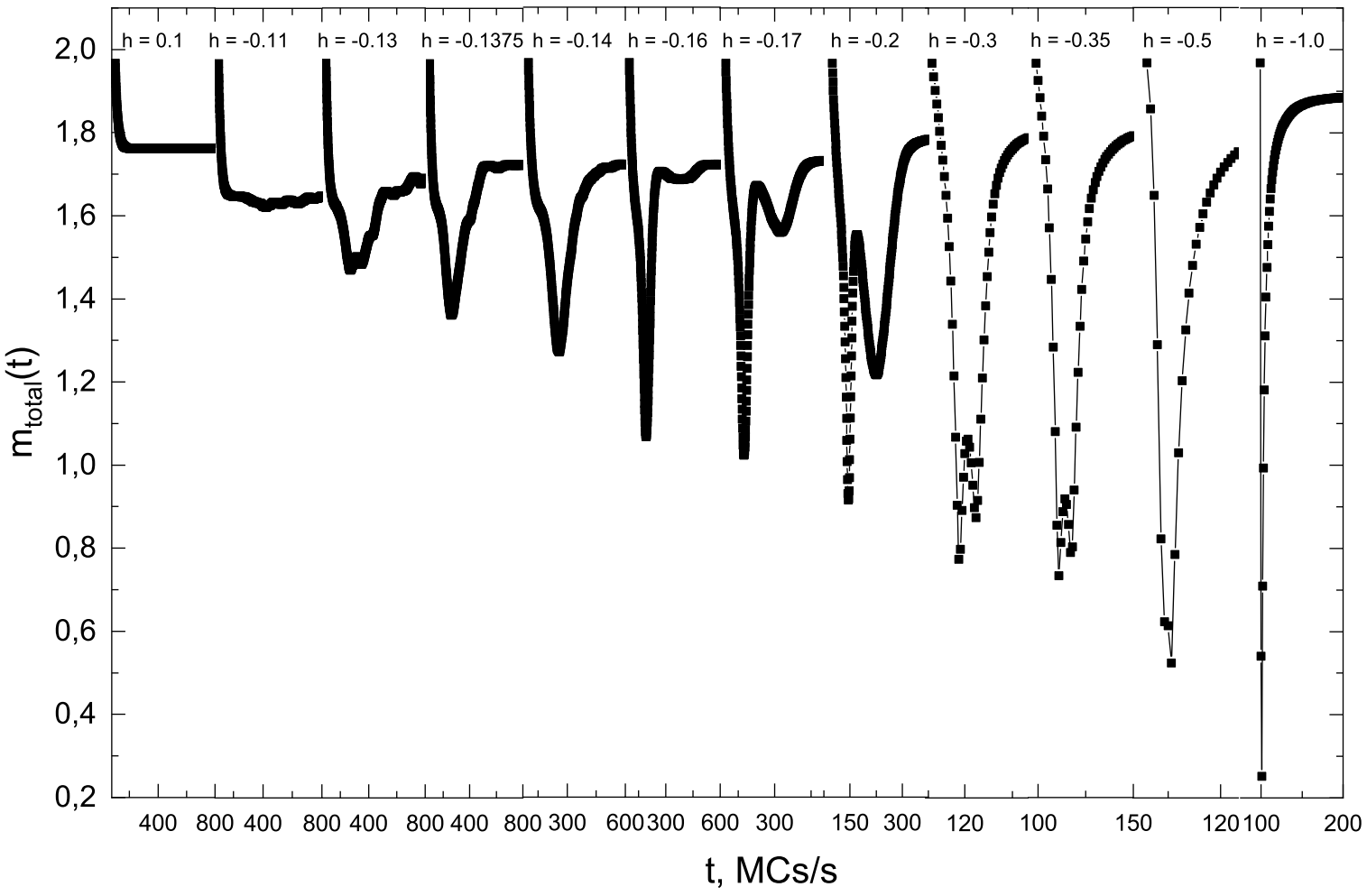

Рис. 7: Переход из разных типов релаксаций m_{total} с начальными условиями: $T_o = 0.0$; $h_o = 0.2$ с начальным паралельным положением намагниченности пленок, после $t_w = 100$ значение температуры $T = 0.6$ для разных значений поля h

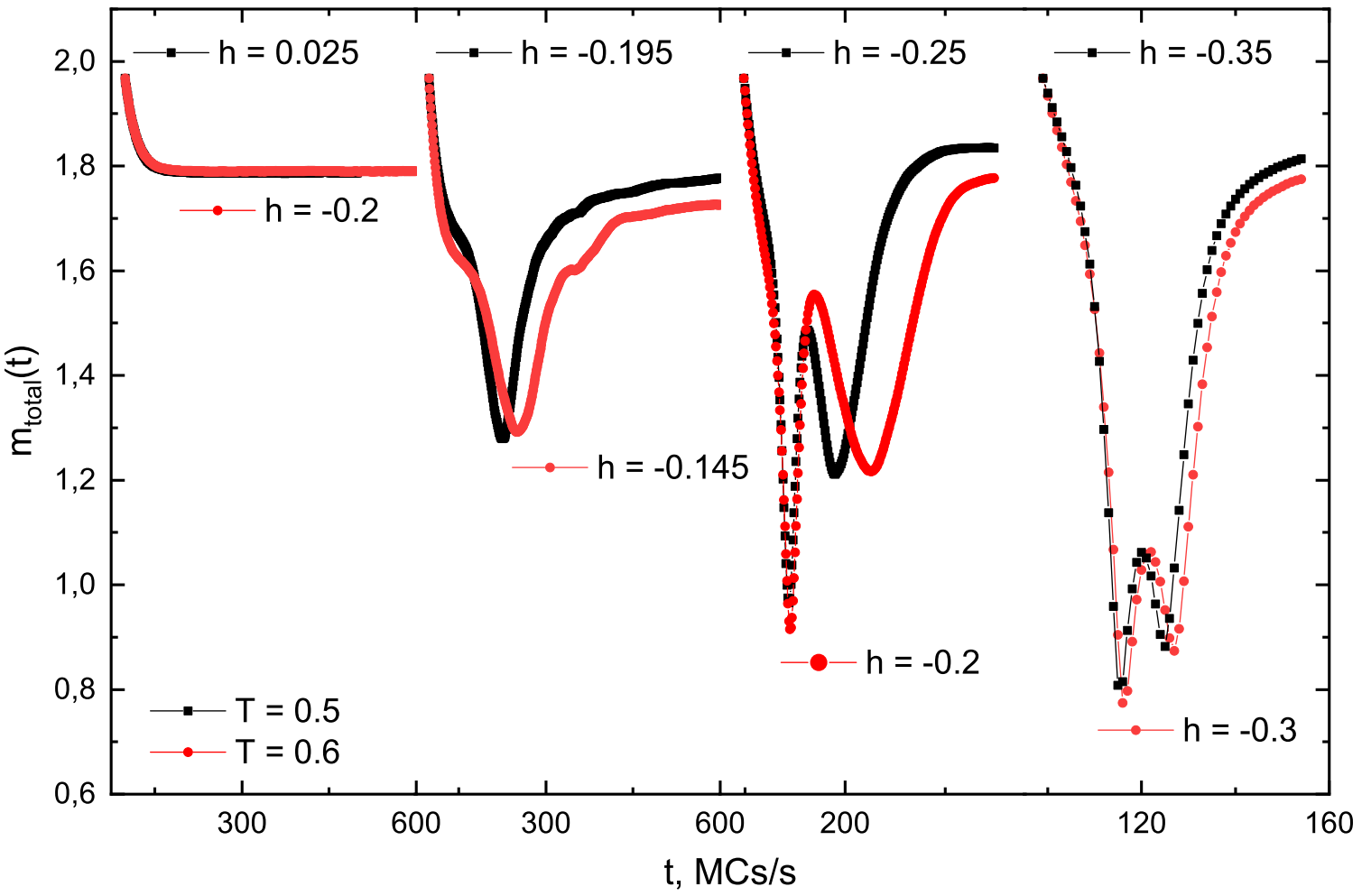

Рис. 8: Значение поле h при котором достигаются одинаковые типы релаксации для разных температур.

Заключение

Определены критичекие температуры мультислойной структуры для разных значений одноионной анизотропии: $T_c(A = 0.0) = 1.33$; $T_c(A = 1.0) = 1.63$; $T_c(A = 2.0) = 1.83$. При увеличении константы анизотропии увеличивается критическая температура.

В исследование эффектов гистерезиса выявлена сильная зависимость от типа параметра анизотропии.
Гистерезис имеет четыре магнитных состояния, пологие участки (промежуточные состояния) намагниченности, соответствующие состоянию переключения слоёв пленки.
Появления остаточной намагниченности является важным свойством для создания постоянных магнитов.

Было показано, что в мультислойнойной магнитной структуре релаксация намагниченности может быть монотонной, немонотонной и осциллирующей.
Начальные условия системы оказывают существенное влияние на релаксационное поведение кривых намагниченности.

Спасибо за внимание!

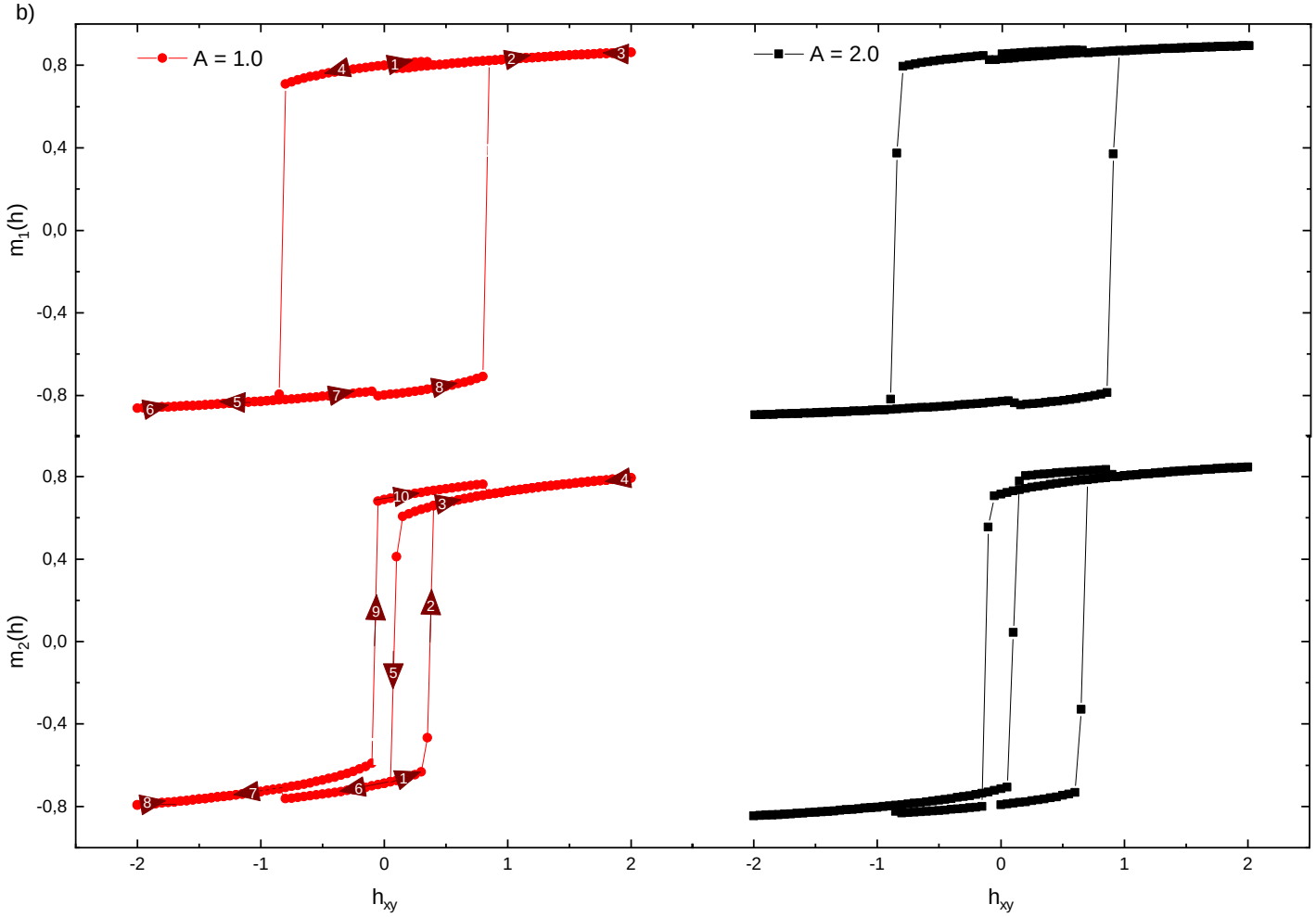

Рис. 9: Петли гистерезиса для каждой из толщин пленки

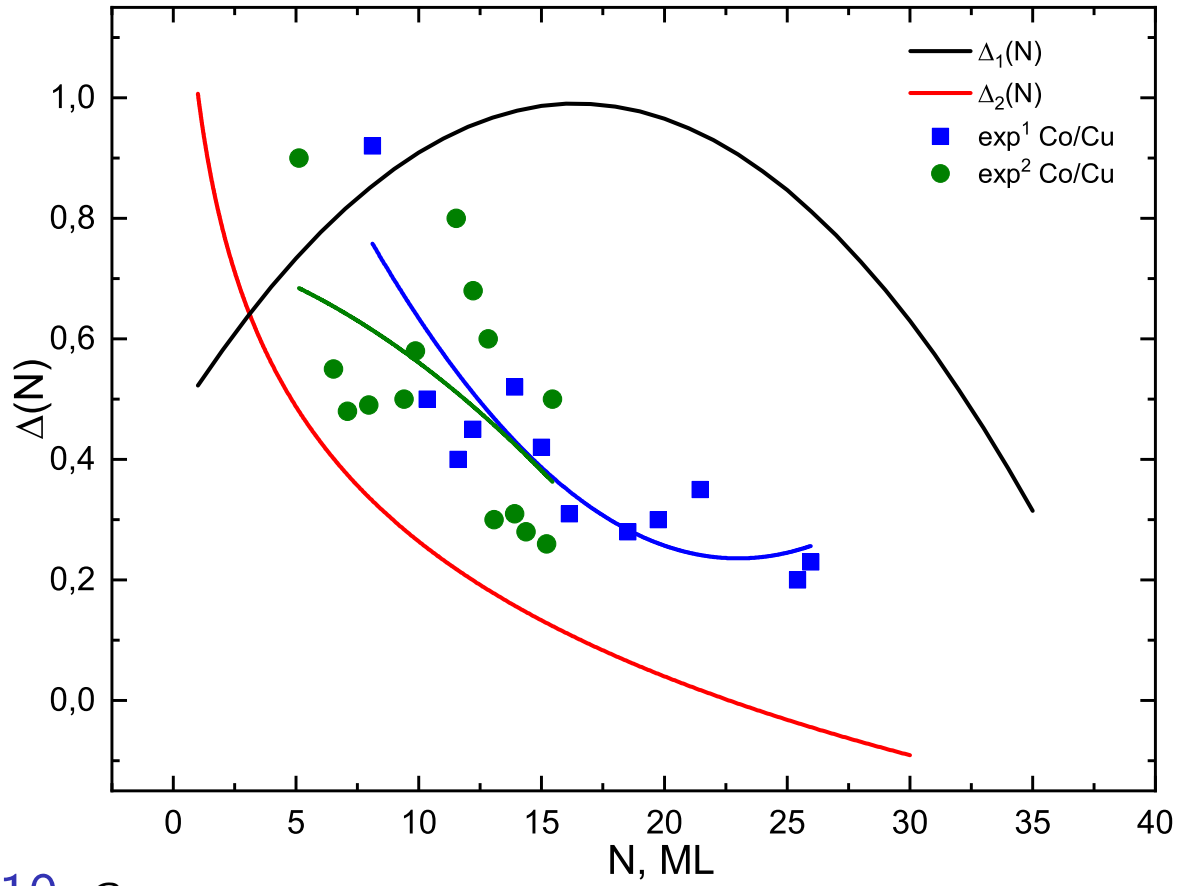

Рис. 10: Зависимость параметра анизотропии от толщины пленки.

Типы анизотропии[6]: $\Delta_1(N)$ – легкая ось; $\Delta_2(N)$ – легкая плоскость. exp[1] Co/Cu из работы[7]; exp[2] Co/Cu из работы[8]

[6] P.V. Prudnikov, V.V. Prudnikov, JMMM, 2019, V. 482. p. 201–205.

[7] P.D. Kim, D.L. Khalyapin, Solid State Physics, 2000, V. 42. N. 9.

[8] P.D. Kim, YuKh. Chen, JETP Letters, 1996, V. 64. N. 5. p. 341-345.

Слагаемые гамильтониана

В гамильтониане из формулы (1) первое слагаемое соответствует изотропной модели Гейзенберга. В нем суммирование проводится по всем парам ближайших соседей. Во втором суммирование проводится по узлам каждой решетки.
Третье слагаемое учитывает одноионную анизотропию системы, с осью направленной перпендикулярно плоскости пленки.
Четвертое – учитывает внешнее магнитное поле. В нем, как и в предыдущем случае, суммирование проводится по всем спинам системы.

J_2 = - 0.2 J_1

Отрицательность J_2 отражает тот факт, что в мультислойных структурах с эффектом ГМС толщина немагнитной прослойки подбирается так, чтобы дальнодействующее и осциллирующее межслоевое обменное РККИ взаимодействие между спинами ферромагнитных слоев носило эффективный антиферромагнитный характер.
За счет этого взаимодействия намагниченности соседних ферромагнитных слоев ориентируются противоположно друг другу.
Таким обзором, рассматриваемая система моделирует искусственно создаваемые мультислойные структуры, характеризующиеся проявлением эффектов гигантского магнетосопротивления.

Алгоритм Метрополиса

1. Формируем начальную (равновесную) конфигурацию.
2. Производим случайное пробное изменения в начальной конфигурации, т.е. случайным образом выбираем спин и пробуем его опрокинуть.
3. Вычисляем ΔE, т.е. изменение энергии системы, обусловленное произведенным пробным изменением конфигурации.
4. Если $\Delta E \leq 0$, то принимаем новую конфигурацию и переходим к шагу 8.
5. Если $\Delta E > 0$, то вычисляем вероятность перехода $W = \frac{\Delta E}{k_b T}$.
6. Генерируем случайное число r в интервале (0, 1).
7. Если $r \leq W$, то новую конфигурацию принимаем, в противном случае сохраняем предыдущую конфигурацию.
8. Определяем значения требуемых физических величин.
9. Повторяем шаги 2 – 8 для получения достаточного числа конфигураций.
10. Вычисляем среднее по конфигурациям.