

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Нефедченко Василь Федорович

УДК 537.624

**ДАЛЕКИЙ ПОРЯДОК ТА МАГНІТНА РЕЛАКСАЦІЯ
В СИСТЕМАХ ОДНОДОМЕННИХ НАНОЧАСТИНОК**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2002

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Сумському державному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор

Денисов Станіслав Іванович,

Сумський державний університет, завідувач
кафедри загальної та експериментальної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор

Львов Віктор Анатолійович,

Київський національний університет ім. Тараса
Шевченка, професор кафедри математики та
теоретичної радіофізики.

Доктор фізико-математичних наук, професор

Равлік Анатолій Георгійович,

Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”, професор
кафедри фізики металів і напівпровідників.

Провідна установа – Донецький національний університет,

кафедра теоретичної фізики та кафедра фізики
твердого тіла і фізичного матеріалознавства
Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

Захист відбудеться “5” червня 2002 р. о “14” годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. ЕТ, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розісланий “3” травня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Лисенко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Широка перспектива використання магнітних матеріалів, що мають нанокластерну структуру, обумовила інтенсивні дослідження їх властивостей в останні роки. Одними з найбільш перспективних галузей використання таких магнітних матеріалів є радіотехніка та обчислювальна техніка, без якої важко уявити сучасні наукові дослідження і новітні технологічні процеси. Типовим представником нанокластерних структур є системи однодомених феромагнітних частинок, дослідження фазових переходів в яких є одним із актуальних напрямків фізики твердого тіла.

Актуальність теми. Однодоменні феромагнітні частинки є об'єктом пильної уваги дослідників. Це обумовлено, насамперед, тим, що властивості таких частинок є визначальним чинником багатьох характеристик магнітних рідин, дисперсних феромагнетиків, кластерних структур, нових матеріалів для збереження, запису та обробки інформації. Одним з найбільш важливих факторів, які визначають властивості ансамблів однодомених феромагнітних частинок, є магніто-дипольна взаємодія. Вона не тільки може змінювати магнітні властивості ансамблів, але й може призводити до появи в них якісно нових, колективних ефектів.

Особливості магнітних властивостей систем невзаємодіючих малих феромагнітних частинок, що обумовлені тепловими флуктуаціями магнітних моментів частинок, з вичерпною повнотою можуть бути описані в рамках розробленого Брауном підходу. Даний підхід ґрунтується на кінетичному рівнянні для функції розподілу магнітного моменту за напрямками, яке при моделюванні теплового магнітного поля білим шумом зводиться до рівняння Фоккера-Планка. Врахування ж впливу далекодійної магніто-дипольної взаємодії на властивості систем однодомених частинок є досить складною проблемою, яка на даний час не має задовільного вирішення. Як показано в даній дисертаційній роботі, наближення середнього локального дипольного поля, при його визначенні з врахуванням відповідних процедур усереднення і самоузгодження, дозволяє описати ряд характеристик ансамблів взаємодіючих однодомених феромагнітних частинок. Наприклад, умови виникнення в них феромагнітного упорядкування і процес релаксації намагніченості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках тематичного плану науково-дослідницьких робіт: тема № 71.01.02.97–99 д/б “Нерівноважні процеси в системах магнітних доменів та суперпарамагнітних частинок”, держ. реєстрація № 0194U009664; тема № 71.01.03.00–02 д/б “Кооперативні ефекти в ансамблях магнітних наночастинок”, держ. реєстрація № 0100U003229 Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є побудова середньопольової теорії дипольного феромагнетизму і магнітної релаксації в ансамблях однодомених феромагнітних наночастинок, розподілених у немагнітній твердій матриці та взаємодіючих шляхом диполь-дипольної взаємодії.

Об'єкт дослідження – дипольне феромагнітне упорядкування і релаксація намагніченості.

Предмет дослідження – ансамблі однодомених феромагнітних частинок.

Досягнення поставленої мети вимагало розв'язання таких задач:

- отримання загального виразу для середнього локального дипольного поля систем несферичних феромагнітних наночастинок;
- знаходження стаціонарного розв'язку рівняння Фоккера-Планка для розглянутих ансамблів наночастинок;
- одержання та розв'язок рівняння для параметра феромагнітного упорядкування в системах сферичних і несферичних наночастинок;
- знаходження нестационарного розв'язку рівняння Фоккера-Планка для ансамблів сферичних наночастинок;
- виведення рівняння, що описує магнітну релаксацію в системах сферичних наночастинок.

Методи дослідження. Для опису динаміки магнітних моментів використовувалися методи, засновані на стохастичному рівнянні Ландау-Ліфшиця та рівнянні Фоккера-Планка; розв'язок рівняння для параметра порядку знаходився з використанням чисельних методів; методом Крамерса знаходився нестационарний розв'язок рівняння Фоккера-Планка; часи релаксації у випадку високого потенційного бар'єра між рівноважними напрямками магнітних моментів знаходилися з використанням асимптотичних методів обчислення інтегралів.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті теоретичного дослідження властивостей феромагнітних наночастинок одержано такі нові результати:

1. Розвинена середньопольова теорія дипольного феромагнетизму в ансамблях одноосьових феромагнітних наночастинок.
2. Одержано вираз для середнього локального дипольного поля, що діє на довільний магнітний момент, який враховує не тільки анізотропію розподілу наночастинок, але і їх форму.
3. Виведено рівняння, яке зв'язує спонтанну намагніченість ансамблів наночастинок із внутрішніми характеристиками самих наночастинок, характеристиками їх розподілу в просторі та температурою.
4. Знайдено вираз для температури фазового переходу в стан дипольного феромагнетизму і розраховані температурні залежності параметра порядку для різних систем феромагнітних наночастинок.

5. У наближенні середнього локального дипольного поля виведено рівняння, що описує термоіндуковану релаксацію намагніченості в системах взаємодіючих наночастинок.
6. Одержано закон магнітної релаксації двовимірних ансамблів наночастинок, що враховує вплив флуктуюючої складової дипольного поля.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновану теорію дипольного феромагнетизму можна використовувати для інтерпретації експериментальних даних стосовно далекого порядку в системах однодомених феромагнітних частинок. Отримані результати можуть бути також використані при проектуванні й розробці приладів і пристроїв, елементною базою яких є ансамблі однодомених феромагнітних частинок, наприклад, для створення високоємних і компактних пристроїв для запису, зчитування та збереження інформації.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в одержанні таких конкретних результатів: аналіз наукової літератури; проведення аналітичних розрахунків у статтях [1-3]; підготовка другого розділу у статті [4]; підготовка тез доповідей [7-9], а також обговорення матеріалів робіт [5, 6]. Всі чисельні розрахунки дисертант виконав самостійно, а інтерпретацію результатів разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: Науково-технічній конференції викладачів, співробітників і студентів механіко-математичного факультету, присвяченій 90-річчю з дня народження академіка Л.Д. Ландау, (Суми, 1998 р.); Науково-технічних конференціях викладачів, співробітників і студентів механіко-математичного факультету, (Суми, 1999, 2000, 2002 pp.); 14th International Conference on Soft Magnetic Materials, (Balatonfüred, Hungary, 1999 p.); The 1999 IEEE International Magnetics Conference, (Kyongju, Korea, 1999 p.).

Публікації. Основні результати роботи опубліковано у 4 статтях і 5 тезах доповідей загальним обсягом приблизно 1,2 друкованих аркушів. Перелік подано у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 119 сторінок, у тому числі 18 рисунків та перелік посилань з 110 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовані основна мета і задачі роботи, обґрунтована наукова новизна та практична значимість одержаних результатів.

У першому розділі дається огляд наукових праць, починаючи з класичних робіт Нееля і Брауна й до теперішнього часу, що присвячені дослідженню властивостей взаємодіючих і невзаємодіючих наночастинок, динаміки намагніченості та колективних ефектів у системах однодомених феромагнітних частинок з магніто-дипольною взаємодією. Наведені теоретичні та експериментальні роботи, що свідчать про можливість існування далекого порядку в системах однодомених феромагнітних частинок. Проаналізовано стан теорії дипольного феромагнетизму і термоіндукованої релаксації намагніченості, сформульовані невирішені проблеми. На підставі проведеного аналізу окреслено коло задач, розв'язання яких ставиться за мету в дисертаційній роботі.

Другий розділ присвячений побудові у наближенні середнього дипольного поля теорії феромагнітного упорядкування в системах сферичних наночастинок.

У підрозділі 2.1 розглянута модель та одержано основні співвідношення, що використовуються в подальших розрахунках. Основою моделі є припущення, що взаємодія частинок магніто-дипольна і на магнітний момент кожної частинки діє теплове магнітне поле, яке апроксимується гауссівським білим шумом. Припускається також, що легка вісь намагнічування частинок перпендикулярна площині xy (тетрагональна решітка) або лежить в площині xy (прямокутна решітка), і в початковий момент часу магнітні моменти частинок орієнтовані вздовж цієї вісі. В рамках даної моделі динаміка довільно виділеного магнітного моменту \mathbf{m} описується стохастичним рівнянням Ландау-Ліфшиця

$$\dot{\mathbf{m}} = -\gamma_e \mathbf{m} \times (\mathbf{H}_e + \boldsymbol{\eta}) - (\lambda \gamma_e / m) \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{H}_e), \quad (1)$$

де $\gamma_e (> 0)$ – гіромагнітне відношення; λ – параметр згасання Ландау-Ліфшиця; $m = |\mathbf{m}|$ – модуль магнітного моменту; \mathbf{H}_e – ефективне магнітне поле, яке діє на магнітний момент; $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}(t)$ – гауссівське δ -корельоване теплове магнітне поле, яке визначається співвідношеннями:

$$\overline{\eta_\alpha(t)} = 0, \quad \overline{\eta_\alpha(t) \eta_\beta(t + \tau)} = (2\lambda kT / \gamma_e m) \delta_{\alpha\beta} \delta(\tau),$$

де k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; $\delta_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\alpha, \beta = x, y, z$ – осі декартової системи координат; $\delta(\tau)$ – δ -функція; риска над функцією позначає усереднення по

реалізаціям теплового магнітного поля η .

У підрозділі 2.3 у наближенні середнього локального дипольного поля вивчені особливості фазового переходу парамагнетик-феромагнетик в ансамблях сферичних наночастинок, розподілених по вузлах тетрагональної та прямокутної решіток. У пункті 2.3.1 розглядається ансамбль наночастинок радіуса R , розподілених із ймовірністю p по вузлах простої тетрагональної решітки з періодом $d_1 (\geq 2R)$ уздовж осей x та y , та $d_2 (\geq 2R)$ уздовж вісі z . Проведено усереднення рівняння (3) по можливим розміщеннях частинок і підсумовування за всіма радіус-векторами вузлів решітки (відповідно до нашої моделі радіус-вектори \mathbf{r}_i вузлів визначаються співвідношенням $\mathbf{r}_i = d_1(n_1\mathbf{e}_x + n_2\mathbf{e}_y) + d_2n_3\mathbf{e}_z$, де n_1, n_2, n_3 – цілі числа, які не дорівнюють нулю одночасно). У результаті для середнього магнітного поля одержано такий вираз:

$$H(t) = 8n\xi S(\xi)\overline{m_z(t)},$$

де $n = p/d_1^2d_2$ – концентрація частинок; $\xi = d_2/d_1$ – параметр, що характеризує анізотропію розподілу частинок (випадок $\xi = 1$ відповідає ізотропному розподілу частинок);

У третьому розділі вивчається фазовий перехід в упорядкований стан у системах магнітних моментів еліпсоїдальних наночастинок.

У підрозділі 3.1 одержано рівняння еліпсоїда обертання, що описує поверхню еліпсоїдальних наночастинок, з півосями $a = b = R$ і $c = R + \delta$, де R – радіус сферичної наночастинок, $\varepsilon = \delta/R$ – малий параметр.

У підрозділі 3.2 розглянуто випадок, коли еліпсоїдальні частинки займають вузли тетрагональної решітки. Припускається, що осі легкого намагнічування наночастинок паралельні осі z , а поле анізотропії перевищує середнє дипольне поле.

Четвертий розділ присвячений вивченню термоіндукованої релаксації намагніченості ансамблів сферичних наночастинок. В підрозділі 4.1 розглядається релаксація намагніченості у випадку, коли висота потенційного бар'єру між рівноважними напрямками магнітних моментів істотно перевищує теплову енергію ($a(1 - |b(t)|)^2 \gg 1$ і $|b(t)| < 1$). Припускається, що в початковий момент часу всі магнітні моменти орієнтовані уздовж вісі z , а частинки розподілені з деякою ймовірністю по вузлах простої тетрагональної решітки. У наближенні середнього дипольного поля методом Крамерса знайдено нестационарний розв'язок рівняння Фоккера-Планка для функції розподілу магнітного моменту довільної наночастинок. За його допомогою одержано звичайне диференціальне рівняння, що описує релаксацію намагніченості в даних ансамблях. Використовуючи асимптотичні методи обчислення інтегралів, знайдено середній час знаходження магнітного моменту в

станах з $\theta \in (0, \theta_0(t))$ і $\theta \in (\theta_0(t), \pi)$ (θ_0 – полярний кут магнітного моменту, що відповідає максимуму магнітної енергії наночастинки), час релаксації τ_0 початкової намагніченості, час релаксації τ_∞ намагніченості на великих проміжках часу. Показано, що магніто-дипольна взаємодія частинок при $\xi > 1$ обумовлює зменшення часу релаксації початкової намагніченості в порівнянні з випадком невзаємодіючих частинок, а при $\xi < 1$ – збільшення. Для розглянутої в розділі 2 системи Co частинок ($R = 3,5$ нм) при $T/T_C = 0,2$ одержано значення $a \approx 20,8$ і $\tau_0/\tau_n \approx 73$, а у випадку системи Fe частинок ($M_s = 138 \times 10^3$ А/м, $H_a = 123 \times 10^3$ А/м) – $\tau_0/\tau_n \approx 0,9 \exp(1,3a)$. Відзначимо, що виявлене нещодавно в експерименті [3*, 4*] гігантське перевищення τ_0 над τ_n (у $\sim \exp a$ раз) може слугувати якісним підтвердженням розвиненої в даному розділі теорії релаксації намагніченості.

У підрозділі 4.2 вивчається релаксація намагніченості ансамблю феромагнітних частинок, розподілених по вузлам квадратної решітки. Використовуючи метод, розвинений у попередньому розділі, одержано звичайне диференціальне рівняння для закону релаксації намагніченості даного ансамблю наночастинок. Показано, що процес релаксації намагніченості з часом сповільнюється, а зі зменшенням періоду решітки швидкість релаксації збільшується. Знайдені також часи релаксації намагніченості на малих і великих проміжках часу і одержана наближена формула для закону магнітної релаксації.

У висновках подано перелік та стислу характеристику основних результатів дисертації.

ВИСНОВКИ

1. Вперше в рамках наближення середнього локального дипольного поля побудована теорія дипольного феромагнетизму в системах однодомених феромагнітних наночастинок, розподілених у твердій матриці та взаємодіючих шляхом магніто-дипольної взаємодії. Фізичною причиною, яка обумовлює існування або відсутність феромагнітного упорядкування в системі однодомених частинок, є конкуренція взаємодій магніто-дипольної природи, що прагнуть орієнтувати магнітний момент будь-якої частинки відповідно уздовж чи проти намагніченості.

2. Виведено рівняння, яке зв'язує спонтанну намагніченість ансамблів наночастинок з внутрішніми характеристиками самих наночастинок, характеристиками їх розподілу у просторі та температурою. Це рівняння вирішено аналітично (відносно намагніченості) в околі температури фазового переходу системи магнітних моментів наночастинок у феромагнітний стан, і чисельно – в усьому температурному інтервалі існування спонтанної намагніченості.

3. Установлено, що зі збільшенням розміру наночастинок температура фазового переходу в стан дипольного феромагнетизму зростає до температури Кюрі матеріалу частинки. Залежність температури фазового переходу від форми наночастинок обумовлена як анізотропією форми, так і

їх дипольною взаємодією. Дипольна взаємодія у розглянутих ансамблях підвищує температуру переходу для “витягнутих” наночастинок, і знижує – для “сплюснених”.

4. Виведено рівняння, що описує у наближенні середнього локального дипольного поля термоіндуковану релаксацію намагніченості ансамблів наночастинок, висота потенційного бар'єру між рівноважними напрямками магнітних моментів яких істотно перевищує теплову енергію. Його аналіз показав, що процес магнітної релаксації в ансамблях взаємодіючих наночастинок характеризується не одним, як у випадку невзаємодіючих частинок, а двома часами, які сильно розрізняються.

5. Установлено, що дипольна взаємодія приводить до збільшення швидкості магнітної релаксації в порівнянні з випадком невзаємодіючих частинок, а сам процес релаксації сповільнюється з часом. Причиною такої поведінки є зростання з часом висоти потенційного бар'єру, яке, в свою чергу, обумовлено зменшенням середнього дипольного поля в процесі релаксації.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1*. Luttinger J.M., Tisza L. Theory of dipole interaction in crystals // *Phys. Rev.* – 1946. – Vol.70, № 11-12. – P. 954-964.

2*. Cowburn R.P., Adeyeye A.O., Welland M.E. Controlling magnetic ordering in coupled nanomagnet arrays // *New Journal of Physics.* - 1999. – Vol. 1. – P. 16.1-16.9.

3*. Abarra E.N., Suzuki T. Thermal stability of narrow track bits in a 5 Gbit/in² medium // *IEEE Trans. Mag.* – 1997. – Vol. 33. – P. 2995-2997.

4*. Abarra E.N., Glijer P., Kisker H., Okamoto I., Suzuki T. Thermal stability and micromagnetic properties of high density CoCrPtTa longitudinal media // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1997. – Vol. 175. – P. 148-158.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в таких роботах:

1. Денисов С.И., **Нефедченко В.Ф.** Фазовый переход парамагнетик-ферромагнетик в системе однодоменных ферромагнитных частиц // *Вісник Сумського державного університету.* – 1999. – № 2 (13). – С. 12-17.
2. Денисов С.И., **Нефедченко В.Ф.** Ферромагнитное упорядочение в системе несферических наночастиц // *Вісник Сумського державного університету.* – 2000. – № 17. – С. 3-7.
3. Denisov S.I., **Nefedchenko V.F.**, Trohidou K.N. Dipolar ferromagnetism in ensembles of ellipsoidal nanoparticles // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2000. – V. 12. – P. 7111-7115.

4. Денисов С.И., Лютый Т.В., **Нефедченко В.Ф.** Магнитная релаксация в двухмерных ансамблях наночастиц: приближение среднего поля // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2002. – № 1. – С. 17-24.
5. Денисов С.И., **Нефедченко В.Ф.** Статистические характеристики решений стохастического уравнения прецессии // *Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов механико-математического факультета, посвященной 90-летию со дня рождения академика Л.Д. Ландау.* – Сумы: СумГУ. – 1998. – С. 101-102.
6. Denisov S.I., **Nefedchenko V.F.** Ferromagnetic ordering and magnetic relaxation in a system of interacting single-domain particles // *Proc. The 1999 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG'99).* – Kyongju (Korea). – 1999. – P. 127.
7. Denisov S.I., **Nefedchenko V.F.** Magnetic relaxation of close-packed single-domain ferromagnetic particles // *Proc. 14th International Conference on Soft Magnetic Materials (SMM14).* – Balatonfüred (Hungary). – 1999. – P. P1/1-282.
8. Денисов С.И., **Нефедченко В.Ф.** Фазовый переход в системе однодоменных несферических частиц // *Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов механико-математического факультета.* – Сумы: СумГУ. – 1999. – С. 103-104.
9. **Нефедченко В.Ф.** Ферромагнитное упорядочение в двумерной решетке однодоменных частиц // *Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов механико-математического факультета.* – Сумы: СумГУ. – 2000. – С. 51-52.

АНОТАЦІЯ

Нефедченко В.Ф. Далекий порядок та магнітна релаксація в системах однодоменних наночастинок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2002.

До захисту подані результати досліджень, які викладені в 9 наукових працях. У них побудована середньопольова теорія дипольного ферромагнетизму і магнітної релаксації. Вперше в рамках наближення середнього локального дипольного поля побудована теорія дипольного ферромагнетизму в системах однодоменних ферромагнітних наночастинок, розподілених у твердій матриці та взаємодіючих шляхом магніто-дипольної взаємодії. Виведено рівняння, яке зв'язує спонтанну намагніченість ансамблів наночастинок з внутрішніми характеристиками самих наночастинок, характеристиками їх розподілу у просторі та температурою. Виведено рівняння, що описує у наближенні середнього локального дипольного поля термоіндуковану релаксацію намагніченості

ансамблів наночастинок, висота потенційного бар'єру між рівноважними напрямками магнітних моментів яких істотно перевищує теплову енергію.

Ключові слова: однодоменна ферромагнітна наночастинка, теплові флуктуації, середнє локальне дипольне поле, дипольний ферромагнетизм, магнітна релаксація.

АННОТАЦІЯ

Нефедченко В.Ф. Дальний порядок и магнитная релаксация в системах однодоменных наночастиц. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2002.

На защиту выносятся результаты 9 научных работ, в которых построена среднеполевая теория дипольного ферромагнетизма и магнитной релаксации. Впервые в рамках приближения среднего локального дипольного поля построена теория дипольного ферромагнетизма в системах однодоменных ферромагнитных наночастиц, распределенных в твердой матрице и взаимодействующих посредством магнито-дипольного взаимодействия. Физической причиной, обуславливающей существование или отсутствие ферромагнитного упорядочения в системе однодоменных частиц, является конкуренция взаимодействий магнито-дипольной природы, стремящихся ориентировать магнитный момент любой частицы соответственно вдоль и против намагниченности. Выведено уравнение, связывающее спонтанную намагниченность ансамблей наночастиц с внутренними характеристиками самих наночастиц, характеристиками их пространственного распределения и температурой. Зависимость температуры фазового перехода от формы наночастиц обусловлена как анизотропией формы, так и их дипольным взаимодействием. Дипольное взаимодействие в рассмотренных ансамблях повышает температуру перехода для “вытянутых” наночастиц, и понижает – для “сплюснутых”. Выведено уравнение, описывающее в приближении среднего локального дипольного поля термоиндуцированную релаксацию намагниченности ансамблей наночастиц, высота потенциального барьера между равновесными направлениями магнитных моментов которых существенно превышает тепловую энергию. Его анализ показал, что процесс магнитной релаксации в ансамблях взаимодействующих наночастиц характеризуется не одним, как в случае невзаимодействующих частиц, а двумя сильно различающимися временами. Установлено, что дипольное взаимодействие приводит к увеличению скорости магнитной релаксации по сравнению со случаем невзаимодействующих частиц, а сам процесс релаксации замедляется со временем. Причиной такого поведения является возрастание со временем высоты потенциального барьера, которое, в свою очередь, обусловлено уменьшением среднего дипольного поля в процессе релаксации.

Ключевые слова: однодоменная ферромагнитная наночастица, тепловые флуктуации, среднее локальное дипольное поле, дипольный ферромагнетизм, магнитная релаксация.

ABSTRACT

Nefedchenko V.F. Long-range ordering and magnetic relaxation in a system of single-domain ferromagnetic nanoparticles. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.04.07 – solid state physics. – Sumy State University, Sumy, 2002.

9 scientific articles are defended in which the theory of dipolar ferromagnetism and magnetic relaxation are developed. For the first time in an approximation local-mean dipolar field the theory of dipolar ferromagnetism in systems of single-domain ferromagnetic nanoparticles distributed in solid matrix with dipolar interaction is developed. The equation connecting spontaneous magnetization of ensembles nanoparticles with inner characteristics of particles and characteristics of their distribution in space and temperature is obtained. For ensembles of nanoparticles in an approximation local-mean dipolar field the equation describing thermalinduced relaxation of a magnetization is obtained.

Key words: single-domain ferromagnetic nanoparticle, thermal fluctuations, local-mean dipolar field, dipolar ferromagnetism, magnetic relaxation.