

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Боднарука Андрія Васильовича «Критичні та нелінійні властивості магнітних нанопорошків та магнітоактивних еластомерів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Боднарука А.В. присвячена експериментальним дослідженням фізичних властивостей магнітних наночастинок поблизу точки Кюрі, а також з'ясуванню особливостей намагнічування магнітоактивних еластомерів з магніто-м'якими багатодоменними феромагнітними включеннями, які останнім часом викликають значний науковий інтерес, як з точки зору фундаментальних питань фізики систем магнітних наночастинок, так і можливості їх практичного використання в системах магнітного запису, магнітних сенсорах та медицині. Так, магнітні наночастинки магнетиту чи заміщених перовськітоподібних манганітів можуть застосовуватися для адресної доставки ліків, магнітно-резонансної томографії та для медичної гіпертермії. Можливості такого застосування пов'язані з особливостями поведінки ансамблів магнітних наночастинок, їх розміром, температурою Кюрі, залежністю магнітних характеристик поблизу температури Кюрі, тобто поблизу переходу з феромагнітного до парамагнітного стану. Необхідним також є вивчення поведінки не однорідних ансамблів магнітних наночастинок в області цього фазового переходу.

Магнітоактивні еластомери, тобто, еластомери з включеннями феромагнітних частинок, демонструють цікаві властивості, наприклад, значну величину вимушеної магнітострикції, великий магнітодіелектричний ефект та ефект пам'яті форми. Також, в магнітоактивних еластомерах в зовнішньому магнітному полі можуть суттєво змінюватись величини пружних модулів. Вивчення властивостей таких композитів необхідне для їхнього можливого практичного застосування.

Отже, тема дисертаційної роботи є **актуальною**, проведені дослідження носить самостійний характер.

Дисертація є частиною досліджень, які проводились в рамках бюджетної тематики у відділі фізики магнітних явищ Інституту фізики НАН України.

Загальна характеристика дисертаційної роботи та автореферату.

Метою дисертаційної роботи було вивчення особливостей перемагнічування ансамблю магнітних наночастинок поблизу точки Кюрі та встановлення впливу еластичності матриці та магнітоіндукованої анізотропії на магнітні властивості магнітоактивних еластомерів під час перемагнічування.

Структура і об'єм дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Обсяг дисертації складає 162 сторінки, містить 49 рисунків, 1 таблицю та 270 бібліографічних джерел.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами, визначено об'єкт, мету, завдання та методи дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів роботи, надано інформацію про апробацію результатів дисертаційного дослідження, кількість публікацій за темою дисертації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** розглянуто основні питання, пов'язані з проблемами поведінки та практичного застосування магнітних наночастинок та магнітоактивних еластомерів. Зроблено літературний огляд попередніх досліджень за темою дисертації та обґрунтовано актуальність теми дослідження.

У **другому розділі** наведено результати досліджень магнітостатичних властивостей та низькочастотної сприйнятливості ансамблю МНЧ манганіту $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ з $x=0,23$ (надалі LSMO), отриманого золь-гель методом. Досліджуваний зразок порошку LSMO синтезовано та охарактеризовано в Інституті загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України у групі під керівництвом академіка НАН України А. Г. Білоуса.

З магнітостатичних та вимірювань у змінному магнітному полі отримано, що намагнічування наночастинок досліджуваного зразка LSMO відрізняється від характеру намагнічування ідеальної системи суперпарамагнітних частинок. Знайдена з даних магнітостатичних вимірювань величина середнього часу релаксації виявилася завищеною. Отримані з вимірювань у змінному магнітному полі амплітудні залежності дійсної та уявної компонент магнітної сприйнятливості вказують на не ланжевенівський характер намагнічування досліджуваного зразка.

З калориметричних вимірювань, проведених на магнітних рідинах на основі LSMO, слідує, що гістерезисний характер магнітних втрат переважає у розглянутих ансамблях магнітних наночастинок.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень польових залежностей намагніченості нанопорошку LSMO, виміряних за різних температур. Проведено аналіз магнітної поведінки ансамблю магнітних наночастинок LSMO. Показано, що, незважаючи на дисперсію розміру, складу, магнітних параметрів, можна ввести фізично обґрунтовані характеристики, які дозволяють описати поведінку ансамблів магнітних наночастинок LSMO. Показано, що поблизу ефективної температури Кюрі наночастинок знаходяться в стані, що є сумішшю суперпарамагнітних і парамагнітних частинок. Визначено, що намагніченість ансамблю демонструє критичну поведінку нижче ефективної температури Кюрі, за винятком вузького діапазону дисперсії

окремих температур Кюрі. Отриманий для досліджуваного ансамблю критичний показник β майже в два рази більший, ніж для відповідного об'ємного матеріалу.

У **четвертому розділі** розглянуто магнітні властивості магнітоактивного еластомеру, що містить магніто-м'які багатодоменні феромагнітні частинки мікронного розміру та показано вплив блокування зміщення частинок наповнювача на магнітні та механічні властивості магнітоактивного еластомеру за рахунок затвердіння матриці під час пониження температури. Вивчався магнітоактивний еластомер на основі полідиметилсилоксану, наповненого порошком карбонільного заліза з середнім діаметром частинок 4,5 мкм. Встановлено, що при значній жорсткості матриці за низьких температур перемагнічування магнітоактивного еластомеру відбувається без гістерезису, а частинки феромагнітного наповнювача, не можуть рухатися одна відносно одної. У випадку безгістерезисного перемагнічування константа Релея є від'ємною. Підвищення температури супроводжується розм'якшенням еластомерної матриці в інтервалі температур 220 К - 230 К. Феромагнітні частинки набувають можливості переміщуватись під впливом магнітних сил. Це розблокування переміщень феромагнітних частинок супроводжується появою магнітного гістерезису в ненульових полях, при цьому форма цих петель істотно не змінюється до кімнатної температури. На залежності диференціальної магнітної сприйнятливості, спостерігається гістерезис.

У **п'ятому розділі** наведено результати вивчення магнітної анізотропії магнітоактивних еластомерів з пружною матрицею. Показано, що матеріал, який є ізотропним за відсутності зовнішнього магнітного поля, у сильних магнітних полях набуває анізотропію, константа якої перевищує пружну константу матриці. Анізотропія, зумовлена магнітним полем, є одновісною, а легка вісь намагніченості спрямована вздовж магнітного поля при намагнічуванні зразка за кімнатної температури. Була виміряна густина енергії магнітної анізотропії. Максимальна константа анізотропії частинок наповнювача щонайменше на порядок більша за пружний модуль зсуву чистого еластомеру.

В **додатку** наведено список публікацій дисертанта за темою дисертації.

Наприкінці оригінальних розділів наведено загальні висновки, у яких відображено найбільш вагомі результати роботи.

Структурна побудова і зміст **автореферату** ідентичні основним положенням дисертації. Наукові положення, висновки й рекомендації, наведені в авторефераті, належним чином розкрито та обґрунтовано в рукописі дисертації.

Оцінюючи дисертаційне дослідження Боднарука А.В., слід зазначити наступні результати, що мають вагому **наукову новизну**.

Встановлено, що намагнічування магнітних наночастинок LSMO відрізняється від намагнічування ідеальної системи суперпарамагнітних

частинок. Знайдена з даних магнітостатичних вимірювань величина середнього часу релаксації виявилася завищеною.

Показано, що гістерезисний характер магнітних втрат, а отже нагрів наночастинок змінним магнітним полем для їх можливого застосування у медичній гіпертермії, є визначальним у розглянутих системах магнітних наночастинок LSMO.

Показано, що для ансамблю суперпарамагнітних частинок з незначною неоднорідністю магнітних параметрів може бути введена ефективна температура Кюрі, поблизу якої наночастинки знаходяться у стані, що є сумішшю суперпарамагнітних і парамагнітних частинок, а критичний показник β для ансамблю, обчислений відносно цієї ефективної температури, майже у два рази більший, ніж для відповідного об'ємного матеріалу.

При низьких температурах жорсткість матриці магнітоактивного еластомеру значно збільшується, внаслідок чого частинки наповнювача, які є магніто-м'якими, не можуть рухатися одна відносно одної під час їх намагнічування. Встановлено, що в цьому випадку перемагнічування магнітоактивного еластомеру відбувається без гістерезису.

Показано, що з підвищенням температури еластомерна матриця розм'якшується в діапазоні температур 220 К – 225 К для зразка магнітоактивного еластомеру. Це пом'якшення супроводжується появою гістерезису на петлях перемагнічування, форма яких практично не змінюється під час подальшого нагрівання зразка до кімнатної температури.

Встановлено, що в зразку під час охолодження в магнітному полі виникає анізотропія, яка є одновісною, а легка вісь намагніченості спрямована вздовж намагнічуючого магнітного поля.

Достовірність наукових положень та висновків.

Достовірність отриманих результатів та висновків, які сформульовані у дисертаційній роботі Боднарука А.В., визначається використанням сучасних та добре перевірених експериментальних методів досліджень та фахово проведеним теоретичним аналізом отриманих результатів. Наведені в дисертаційній роботі результати узгоджуються з існуючими положеннями фізики твердого тіла та літературними даними.

Апробація результатів та повнота відображення в опублікованих роботах.

Основні результати та висновки дисертації опубліковано в 6 статтях у міжнародних журналах, облікованих базами Scopus і Web of Science та у 7 тезах доповідей на міжнародних конференціях.

Наукове та практичне значення одержаних результатів.

Отримані результати досліджень процесів, що відбуваються в ансамблях магнітних наночастинок LSMO в області поблизу точки Кюрі дозволяють розробити методику контролю параметрів неоднорідних ансамблів магнітних

наночастинок, необхідну для їх практичного використання. Це, наприклад, медичні застосування для магнітної гіпертермії. Результати, отримані в роботі, можуть використовуватися, також, для опису фазового переходу другого роду в ансамблях магнітних наночастинок та в неоднорідних магнітних середовищах.

Зауваження.

1. В кваліфікаційній дисертаційній роботі варто було б опис зразків і методів дослідження зробити в окремому розділі.
2. В тексті дисертації і автореферату є певна кількість несуттєвих орфографічних помилок.

Висновок.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Вона представляє собою завершену кваліфікаційну працю, яка базується на значному об'ємі експериментального і теоретичного матеріалу. Автореферат та опубліковані роботи адекватно відображають суть та зміст дисертації.

Вважаю, що як за обсягом, так і за актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю та достовірністю результатів, робота **«Критичні та нелінійні властивості магнітних нанопорошків та магнітоактивних еластомерів»** задовольняє вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затверджену Постановою КМУ № 567 від 24.07.2013р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015р., № 1159 від 30.12.2015р., № 567 від 27.07.2016р. та № 607 від 15.07.2020 р.), а її автор **Боднарук Андрій Васильович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Канд. фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник відділу фізики плівок
Інституту магнетизму НАН України та МОН України

В.В. Невдача

Підпис Невдачі В.В. засвідчую
Вчений секретар
Інституту магнетизму НАН України та МОН України
Канд. фіз.-мат. наук

А.О. Хребтов