

**Національна академія наук України
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова**

Єршов Костянтин Васильович

УДК 537.611, 537.622.4

**Магнітні властивості викривлених
низьковимірних систем**

01.04.02 – теоретична фізика

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
Кравчук Володимир Петрович,
старший науковий співробітник відділу теорії нелінійних процесів в конденсованих середовищах Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент,
Якименко Олександр Ілліч,
доцент кафедри квантової теорії поля фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
доктор фізико-математичних наук, професор,
Гомонай Олена Василівна,
професор кафедри інформаційної безпеки Фізико-Технічного Інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Захист відбудеться « 27 » квітня 2017 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03143, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03143, Україна.

Автореферат розісланий « 24 » березня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фіз.-мат. наук

В. Є. Кузьмичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Дослідження неоднорідних розподілів намагніченості у тривимірних викривлених структурах із складною геометрією має як фундаментальну, так і прикладну цінність. Фундаментальним є питання впливу кривини на динамічні та статичні властивості намагніченості у викривлених структурах. Наявність нетривіальної геометрії може призвести до нових ефектів, які не спостерігаються у плоских структурах. Практична цінність даних досліджень пов'язана з можливістю використання магнітних доменних стінок та вихорів для виготовлення енергонезалежних елементів пам'яті та інших приладів спінтроники. При цьому з'ясування впливу кривини магнетика на динаміку вказаних структур є принципово важливим.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася у відділі теорії нелінійних процесів в конденсованих середовищах Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова. Дослідження проводилися в рамках наступних наукових тем:

- дослідження за держбюджетною темою «Ефективне керування динамікою нелінійних збуджень в макромолекулярних та магнітних нано-системах», державний реєстраційний номер 0110U07540, термін виконання 2011-2015 роки;
- дослідження за держбюджетною темою «Мікроскопічні та феноменологічні моделі фундаментальних фізичних процесів у мікро- та макросвіті» державний реєстраційний номер 0112U000056, термін виконання 2011-2016 роки;
- дослідження за держбюджетною темою «Особливості механічних, електронних та магнітних процесів у низьковимірних системах на наномасштабах» державний реєстраційний номер 0116U003192, термін виконання 2016-2020 роки;
- науковий проект «Dynamics of topologically nontrivial magnetic textures in 3D shaped nanowires» за підтримки DAAD (Deutsche Akademische Austauschdienst Dienst, DAAD), реєстраційний номер 91618879, термін виконання 2016 рік; індивідуальний проект.

Мета і завдання дослідження.

Метою даної дисертаційної роботи є аналітичне та чисельне дослідження:

1. статичних та динамічних властивостей поперечної доменної стінки у плоскому феромагнітному нанодроті з локалізованою кривиною;
2. впливу кривини та кручення на динаміку спінових хвиль у тривимірній спіралі, а також на динаміку поперечної доменної стінки під впливом спін-поляризованого струму та ефективного поля Рашби;
3. ролі кривини у процесі контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору на півсферичній оболонці.

Об'єктом дослідження є статичні та динамічні явища в феромагнітних системах.

Предметом дослідження є неоднорідні розподіли намагніченості в одно- та двовимірних магнетиках: доменні стінки, магнітні вихори.

Методи дослідження. Усі розрахунки виконані в рамках феноменологічної моделі Ландау–Ліфшиця–Гільберта. Вплив спін-поляризованого струму враховувався за методом Базалія–Жанга–Лі. Під час досліджень використовувалися методи колективних змінних (для аналізу статичних та динамічних властивостей доменної стінки). Усі аналітичні розрахунки перевірялися за допомогою комп'ютерних моделювань на обчислювальному кластері Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова. Моделювання проводились у загальнодоступному пакеті для мікромагнітних моделювань Nmag та власноруч розробленому симуляторі, який чисельно розв'язував систему рівнянь Ландау–Ліфшиця–Гільберта для ланцюжка магнітних моментів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні характеру динаміки доменної стінки на локальному згині магнітного нанодроту, рівноважних розподілів намагніченості у тривимірній феромагнітній спіралі, впливу геометричних параметрів на динаміку магнітонів та доменних стінок у тривимірній спіралі, впливу кривини на процес перемикування хіральності магнітного вихору під дією просторово однорідного магнітного імпульсу. Оригінальні результати є наступними:

1. Встановлено, що локальний згин магнітного дроту виступає в якості притягаючого потенціалу для доменної стінки; отримано вирази для частоти власних коливань та ефективного коефіцієнта релаксації для доменної стінки. Показано, що напрямок поперечної намагніченості доменної стінки визначається її топологічним зарядом.
2. Знайдено можливі рівноважні стани намагніченості феромагнітного нанодроту у формі тривимірної спіралі для різних орієнтацій осі легкого намагнічування: у тангенціальному, нормальному та бінормальному напрямках. Встановлено, що кривина та кручення суттєво змінюють дисперсійну залежність магнітонів у тривимірній спіралі з легко-тангенціальною анізотропією: кривина призводить до зменшення щільності в спектрі, а кручення – до лінійного зсуву по хвильовому вектору.
3. Описано динаміку поперечної доменної стінки у тривимірній спіралі під дією спін-поляризованого струму та ефективного поля Рашби. Встановлено, що наявність кривини призводить до появи Уокерівської границі, кручення призводить до зсуву матеріального параметра неадіабатичності, що у свою чергу може призвести до від'ємної рухливості. В широкому діапазоні параметрів напрямок руху доменної стінки визначається знаком добутку топологічного заряду доменної стінки на геометричну хіральність спіралі. Запропоновано механізм для визначення матеріального параметра неадіабатичності.
4. Запропоновано метод контрольованого перемикування хіральності магнітного вихору на півсферичній оболонці. Встановлено, що при поступовому випрямленні оболонки до форми диску (збільшення

радіуса кривини) поле, необхідне для перемикання хіральності магнітного вихору, зростає. Розраховано діаграми перемикання та описано два можливі механізми перемикання хіральності магнітного вихору.

Практичне значення одержаних результатів.

Отримані результати є внеском у дослідження впливу криволінійних ефектів на статичні та динамічні властивості просторово-неоднорідних розподілів намагніченості у магнітних структурах. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для створення запам'ятовуючих пристроїв інформації, які базуються на використанні доменних стінок і магнітних вихорів; приладів спінтроники.

Особистий внесок здобувача.

Автор безпосередньо приймав участь у постановці задачі, розробці прийомів та методів розв'язку, проведенні розрахунків та написанні статей. Основні результати, які складають зміст дисертаційної роботи, були отримані особисто здобувачем:

1. Передбачено закріплення доменної стінки на локальному згині магнітного нанодроту. Отримано вирази для частоти власних коливань та ефективного коефіцієнта релаксації доменної стінки від кривини та її похідних у точці згину. Оpubліковано в [1].
2. Шляхом мікромагнітних моделювань побудовано діаграми рівноважних станів намагніченості у тривимірній спіралі з різними напрямками легкої осі анізотропії. Отримано закони дисперсії для магнонів. Оpubліковано в [2].
3. Виконано чисельне дослідження впливу геометричних параметрів тривимірної спіралі на рух доменної стінки під дією спін-поляризованого струму. Передбачено можливість від'ємної рухливості доменної стінки, ефект зумовлено крученням дроту. Оpubліковано в [3].
4. Передбачено рух доменної стінки у тривимірній спіралі під дією ефективного поля Рашби. За допомогою мікромагнітних моделювань отримано залежність рухливості доменної стінки від параметрів кривини та кручення. Оpubліковано в [4].
5. Запропоновано метод контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору на півсферичній оболонці під дією просторово однорідного магнітного імпульсу. За допомогою мікромагнітних моделювань побудовано діаграму перемикання та виявлено два механізми перемикання хіральності вихору. Оpubліковано в [5].

Усі результати чисельних розрахунків були також отримані особисто автором.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертації обговорювались на семінарах відділу теорії нелінійних процесів в конденсованих середовищах Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова (Київ); кафедри математики та теоретичної радіофізики

факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ); кафедри фізико-математичних наук Національного Університету «Києво-Могилянська академія» (Київ), Інституту інтегрованих нанонаук (Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Дрезден, Німеччина), Школи математики Бристольського університету (School of Mathematics, University of Bristol, Бристоль, Великобританія), Центр нелінійних досліджень (Center for Nonlinear Studies, Los Alamos National Laboratory, Лос Аламос, США).

Матеріали дисертації пройшли апробацію на ряді міжнародних та всеукраїнських конференцій:

- X International Conference «Electronics and Applied Physics» (Київ, Україна, жовтень 22–25, 2014).
- VI Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics» (Київ, Україна, листопад 25–27, 2014).
- International Conference on Magnetism (Барселона, Іспанія, липень 5–10, 2015).
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (Дніпропетровськ, Україна, вересень 29–жовтень 2, 2015).
- Bogolyubov Conference «Problems of Theoretical Physics» (Київ, Україна, травень 24–26, 2016).
- VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (Харків, Україна, Червень 06–10, 2016).
- Topological Patterns and Dynamics in Magnetic Elements and in Condensed Matter (TopMag) (Дрезден, Німеччина, червень 27–липень 8, 2016).
- International School & Conference on Nanoscience and Quantum Transport (Київ, Україна, жовтень 8–14, 2016).
- VII Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics» (Київ, Україна, грудень 13–15, 2016).

Публікації.

Матеріали, представлені в даній дисертаційній роботі, опубліковано в 15 роботах. Серед них 5 статей у провідних зарубіжних рецензованих наукових журналах [1-5], та 10 матеріалів і тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях [6-15].

Структура та об'єм дисертації.

Робота складається з вступу, чотирьох основних розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел, який містить 154 найменування. Робота викладена на 124 сторінках машинописного тексту, враховуючи 29 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У *вступі* дисертаційної роботи розглядається актуальність теми роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами, представлено наукове та практичне

значення роботи і отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача. Подані відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи та список опублікованих праць. Подано інформацію про об'єм, структуру та зміст дисертаційної роботи.

У першому розділі наводиться огляд фундаментальних магнітних взаємодій, які характерні для феромагнетиків: обмінна взаємодія, взаємодія Дзялошинського–Морії, магнітна анізотропія, взаємодія із зовнішнім магнітним полем, магнітостатична взаємодія. Описано рівняння руху для намагніченості. Також, в рамках цього розділу розглянуто вплив кривини на намагніченість магнетиків різної форми і описано основні ефекти до яких може призвести викривлена геометрія. Обговорюються наведені обміном ефективні взаємодії (анізотропія та взаємодія Дзялошинського–Морії) у викривленому магнетикі.

У другому розділі розглянуто задачу про статичні та динамічні властивості поперечної доменної стінки у плоскому викривленому магнітному нанодроті (кручення рівне нулю), кривина якого змінюється уздовж дроту і представляє собою локалізовану функцію натурального параметру. Серед магнітних взаємодій враховувалась обмінна взаємодія та легковісна магнітокристалічна анізотропія, вісь якої спрямована по дотичній до нанодроту. Вклад від магнітостатичної взаємодії враховувався як додаткова легко-тангенціальна анізотропія з константою $K_{ms} = \pi M_s^2$, де M_s – це намагніченість насичення (тут і надалі використовується система одиниць Гауса). В рамках даного розділу, показано, що локальний згин нанодроту виступає в якості потенціалу притягання для поперечної доменної стінки. Статика і динаміка доменної стінки описувалась в рамках моделі колективних змінних (q – Φ модель Слончевського).

На першому кроці було розраховано рівноважний стан доменної. Показано, що рівноважне положення доменної стінки q_0 на дроті визначається з умови

$$\varkappa'(q_0) = 0, \quad \varkappa''(q_0) < 0,$$

де $\varkappa$ – кривина, а штрих відповідає похідній по безрозмірній координаті $\xi = s / \ell_m$, s – натуральний параметр (координата вздовж дроту), $\ell_m = \sqrt{A / K}$ –

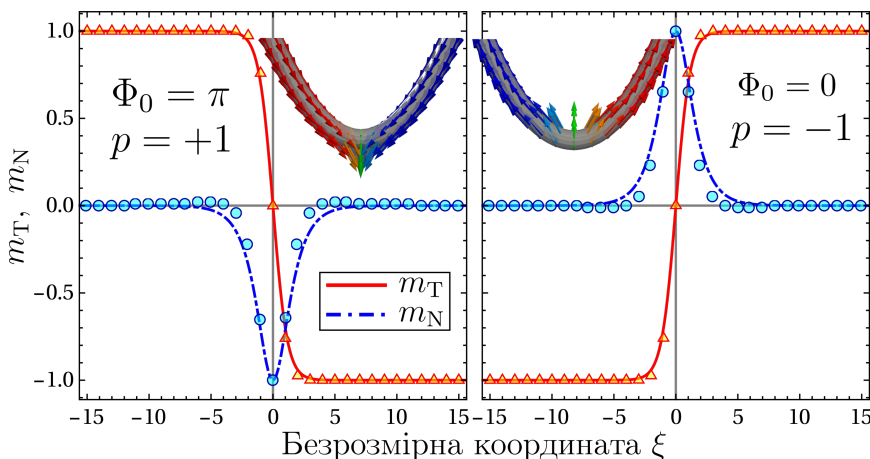


Рис. 1. Рівноважний стан поперечної доменної стінки на локалізованому згині магнітного дроту. Вставки та маркери відповідають результатам чисельного розрахунку. Лінії відповідають q – Φ моделі.

магнітна довжина, A – константа обмінної взаємодії, K – коефіцієнт анізотропії. При цьому рівноважний напрямок поперечної намагніченості стінки визначається

її топологічним зарядом (див. Рис. 1). Стінка типу head-to-head ($p = +1$) завжди намагнічена назовні згину, у той час як поперечна намагніченість стінки типу tail-to-tail ($p = -1$) завжди напрямлена всередину згину. Цим ситуація відрізняється від випадку прямого дроту, де напрямок поперечної намагніченості стінки є невизначеним.

На другому кроці було досліджено лінійну динаміку доменної стінки в околі положення рівноваги. В рамках моделі колективних змінних отримано $\tilde{q} \propto \sin(\Omega t + \varphi_0)e^{-\eta t}$, $\tilde{\Phi} \propto \cos(\Omega t + \varphi_0)e^{-\eta t}$, де $\tilde{q}$ та $\tilde{\Phi}$ є відповідно малими відхиленнями положення та фази доменної стінки від рівноважних значень. У наближенні $\delta_0 \kappa(q_0) \ll 1$ (радіус кривини доменної стінки набагато більший за ширину доменної стінки δ_0) частота власних коливань доменної стінки, та ефективний коефіцієнт релаксації визначаються за формулами

$$\Omega \approx \pi \sqrt{|\kappa(q_0) \kappa''(q_0)|}, \quad \eta \approx \alpha \frac{\pi \kappa(q_0)}{2 \delta_0},$$

де α – релаксаційний параметр Гільберта. Величини Ω та η нормовані на $\Omega_0 = \gamma_0 K / M_s$, де γ_0 – гіромагнітне співвідношення. Частота власних коливань доменної стінки та ефективний коефіцієнт релаксації зростають зі збільшенням кривини у точці згину (див. Рис. 2).

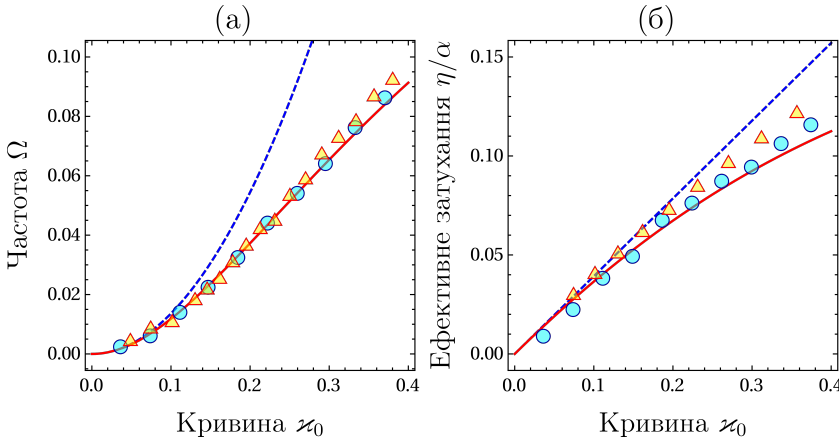


Рис. 2. Частота власних коливань (а) та ефективний коефіцієнт релаксації доменної стінки (б), як функція кривини в точці згину дроту. Штрихована лінія отримана з наближення $\delta_0 \kappa(q_0) \ll 1$, а суцільна $\delta_0 \kappa(q_0) \in (0,1)$. Маркери від-повідають результатам чи-сельного розрахунку. Резу-льтати наведені для дроту зігнутого у формі параболи.

Отримані аналітичні результати добре узгоджуються з чисельними розрахунками.

У третьому розділі розглядаються властивості намагніченості у тривимірній спіралі, для якої геометричні кривина та кручення є сталими величинами. **В підрозділі 3.1** розглянуто рівноважні стани намагніченості спіралі, **в підрозділі 3.2** – проведено лінійний аналіз динаміки магнетонних збурень, **в підрозділі 3.3** – динаміку доменної стінки. Під час розгляду тривимірної спіралі, в енергії магнетика враховувалися обмінна взаємодія та магнітокристалічна анізотропія. В **підрозділах 3.1 та 3.2** було розглянуто три різні напрямки анізотропії: по дотичній до спіралі, а також вздовж векторів нормалі й бінормалі. В **підрозділі 3.3** було

розглянуту лише легко-тангенціальну анізотропію. Внесок від магнітостатичної взаємодії враховувався лише у випадку з легко-тангенціальною анізотропією, як поправка до константи легко-тангенціальної анізотропії величиною $K_{ms} = \pi M_s^2$.

У **підрозділі 3.1** було отримано діаграми рівноважних станів намагніченості тривимірної спіралі для різних типів анізотропії, де в якості керуючих параметрів виступали кривина $\varkappa$ і кручення σ . Виявлено, що для кожного типу анізотропії реалізується два рівноважні стани: стан, який визначається напрямком легкого намагнічування, і *onion* стан – періодичний розподіл намагніченості у криволінійній системі координат. Слід зазначити, що в декартовій системі координат *onion* стан – це квазіоднорідний стан, перпендикулярний до осі спіралі. Розглядаючи розподіли які визначаються напрямком анізотропії, встановлено, що у випадках легко-тангенціальної і легко-бінормальної анізотропії намагніченість відхиляється від напрямку анізотропії. Тому, ми ці стани називаємо відповідно *квазітангенціальним* й *квазібінормальним*. Кут, на який відхиляється намагніченість, пропорційний добутку кривини, кручення і магнітної хіральності $\Theta \propto C\kappa\sigma$. Причиною того, що намагніченість відхиляється від напрямку вектора анізотропії є те, що геометрія спіралі продукує ефективне магнітне поле, яке відхиляє намагніченість. У випадку легко-нормальної анізотропії таке поле відсутнє, тому намагніченість спрямована вздовж вектора анізотропії. Ми цей розподіл називаємо *радіальним*. Структура *onion* стану для досліджених напрямків анізотропії однакова. Межа розділення двох станів $\varkappa_b(\sigma)$ знаходиться з рівності енергії відповідних станів (див. Рис. 3).

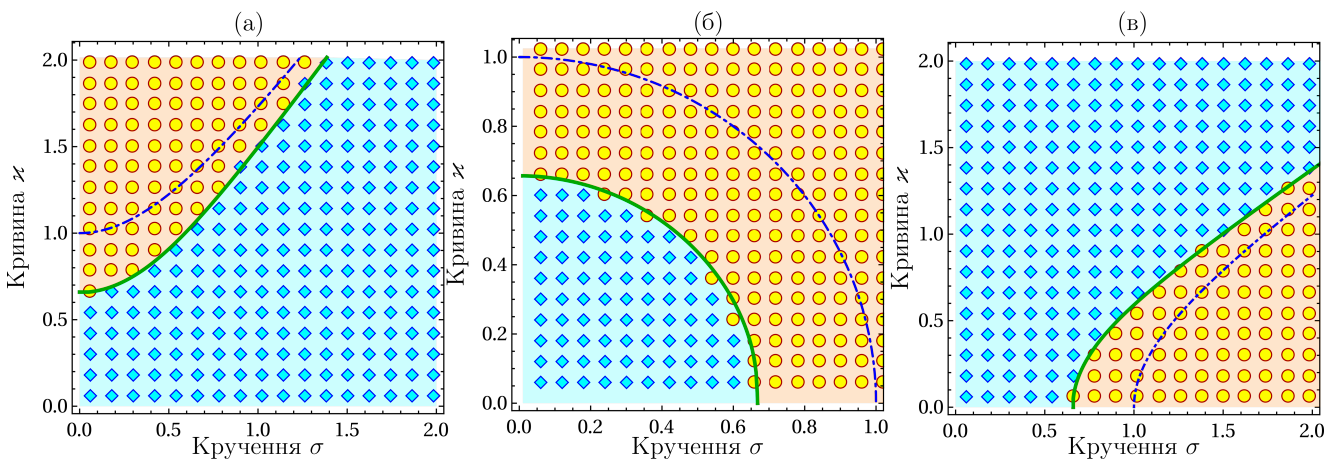


Рис. 3. Рівноважні стани намагніченості у тривимірній спіралі для різних орієнтацій осі легкого намагнічування: (а) уздовж тангенціального напрямку; (б) уздовж вектора нормалі та уздовж вектора бінормалі (в). Ромби відповідають розподілам намагніченості уздовж осі анізотропії, диски – *onion* стан. Зелена лінія визначає границю $\varkappa_b(\sigma)$ розмежування рівноважних станів.

У **підрозділі 3.2** було знайдено дисперсійні залежності для спінових хвиль у тривимірній спіралі. У випадку малих параметрів кривини та кручення ($\varkappa, |\sigma| \ll 1$) дисперсійні залежність для магнетика з легко-тангенціальною анізотропією має вигляд:

$$\Omega^T(q) \approx \Omega_{\text{gap}}^T + (q - C\sigma)^2, \quad \Omega_{\text{gap}}^T = 1 - \frac{\kappa^2}{2},$$

де Ω^T – частоти спінових хвиль для легко-тангенціальної анізотропії, q – безрозмірне хвильове число, $C = \pm 1$ – напрямок намагніченості вздовж спіралі (магнітна хіральність): $C = +1$ – вектор намагніченості спрямований вздовж тангенціального напрямку $C = -1$ – вектор намагніченості спрямований проти тангенціального напрямку. Як видно з виразу для дисперсійної залежності, кривина та кручення суттєво впливають на динаміку спінових хвиль у нанодроті. У випадку легко-тангенціальної анізотропії кручення спіралі призводить до появи в дисперсійній залежності лінійного зсуву у спектрі по хвильовому числу, знак якого визначається добутком кручення на магнітну хіральність, а кривина, у свою чергу, призводить до несуттєвої зміни щілини у магнітонному спектрі (див. Рис. 4(a)). У випадку легко-нормальної анізотропії наявність кривини і кручення призводить лише до зменшення щілини у спектрі, що пояснюється відсутністю відповідного ефективного індукованого кривиною та крученням магнітного поля, яке присутнє у випадку з легко-тангенціальною та легко-бінормальною анізотропією (див. Рис. 4). Випадок з легко-бінормальною анізотропією подібний до випадку з легко-тангенціальною анізотропією, з точністю до заміни $\kappa \leftrightarrow \sigma$.

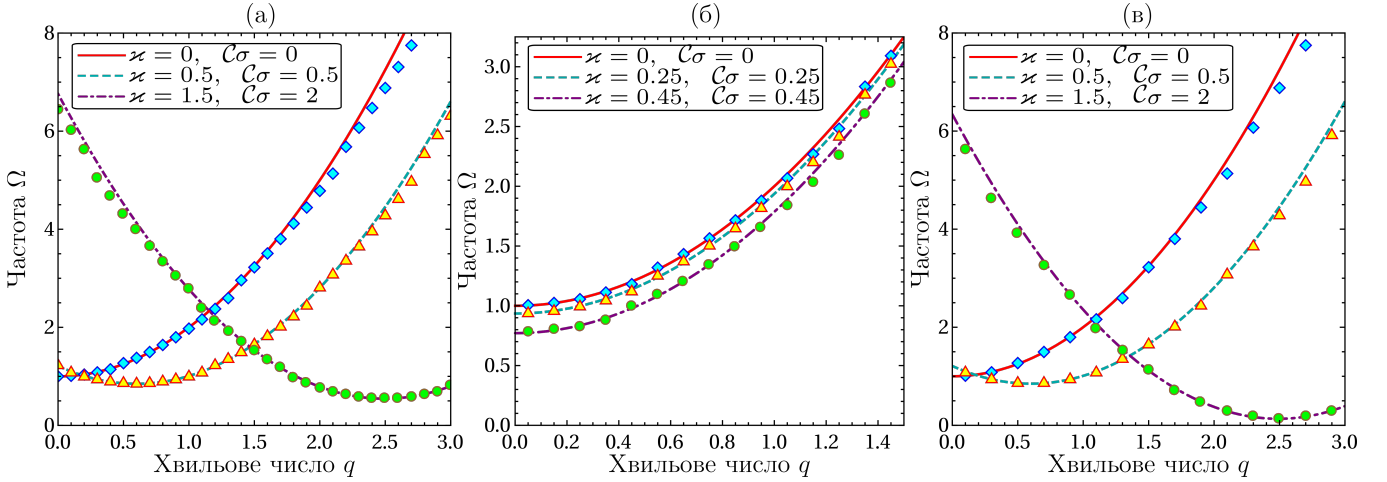


Рис. 4. Спектри магнітонів у тривимірній спіралі: (а) легко-тангенціальна анізотропія, (б) легко-нормальна анізотропія, (в) легко-бінормальна анізотропія. Суцільна лінія відповідає аналітичним результатам, а маркери чисельним розрахункам.

Збільшення кривини та кручення призводить до зменшення щілини у спектрі магнітонів, а отже існує гранична крива $\kappa_c = \kappa_c(\sigma)$, при якій щілина зникає $\Omega(q_c) = 0$. На Рис. 3 побудовано криву $\kappa_c(\sigma)$, штрих пунктирна лінія. В області між кривими розділення фаз $\kappa_b(\sigma)$ та кривою нестабільності $\kappa_c(\sigma)$ стан, який визначається напрямком анізотропії (квазітангенційний, радіальний чи бінормальний) відповідає локальному мінімуму енергії, але стає метастабільним.

У підрозділі 3.3 було досліджено динаміку поперечної доменної стінки під дією спін-поляризованого струму та ефективного поля Рашби. Статика і динаміка доменної стінки описувалась в рамках моделі колективних змінних (узагальнена $q - \Phi$ модель Слончевського).

На першому кроці було розраховано рівноважний стан доменної стінки у тривимірній спіралі. Внаслідок того, що в тривимірній спіралі кривина й кручення стали параметри, то для доменної стінки немає вибраного положення – всі положення еквівалентні. Напрямок поперечної намагніченості доменної стінки визначається її топологічним зарядом, як і у випадку плоского викривленого дроту: стінка типу head-to-head ($p = +1$) завжди намагнічена назовні спіралі, стінка типу tail-to-tail ($p = -1$) завжди напрямлена всередину спіралі. Однак, з'являється ненульова бінормальна компонента намагніченості. Встановлено, що профіль тангенціальної і нормальної компонент визначається топологічним зарядом ($p = \pm 1$) доменної стінки, а профіль бінормальної компоненти визначається добутком топологічного заряду доменної стінки на геометричну хіральність спіралі. Амплітуда бінормальної компоненти намагніченості пропорційна крученню спіралі (див. Рис. 5).

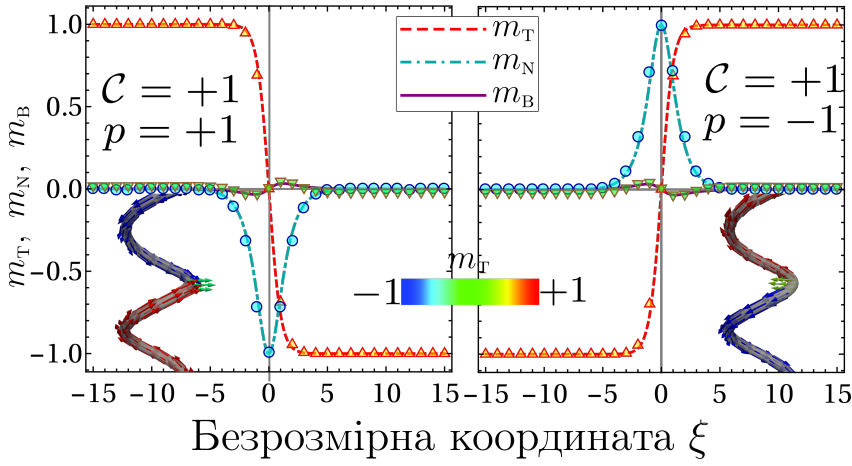


Рис. 5. Рівноважний стан поперечної доменної стінки у тривимірній спіралі. Вставки та маркери відповідають результатам чисельного розрахунку. Лінії відповідають узагальненій $q - \Phi$ моделі.

На другому кроці досліджувалася динаміка доменної стінки під дією спінополяризованого струму. Динаміка намагніченості під дією спінополяризованого струму описується рівнянням Ландау–Ліфшиця–Гільберта з доданками Базалія–Жанга–Лі

$$\dot{\vec{m}} = \vec{m} \times \frac{\delta \mathcal{E}}{\delta \vec{m}} + \alpha \vec{m} \times \dot{\vec{m}} + \vec{m} \times [\vec{m} \times (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{m}] + \beta \vec{m} \times (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{m},$$

де $\mathcal{E} = E / K$ – нормована енергія, $\vec{u} = \vec{j} P g \mu_B / (2 \Omega_0 |e| M_s)$ – нормований струм, який спрямований вздовж тангенціального напрямку $\vec{u} \parallel \vec{e}_T$, $\vec{j}$ – густина спінополяризованого струму, P – ступінь поляризації електронів, g – фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора, e – заряд електронів, β – параметр неадіабатичності, α – параметр релаксації Гільберта. Крапки відповідають похідним по безрозмірному часу $\tilde{t} = t \gamma_0 K / M_s$.

Динаміку доменної стінки, у цьому випадку, можна описати наступною системою рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{q} - \alpha p \delta_0 \dot{\Phi} &= u - \pi \kappa \sin \Phi, \\ \alpha p \dot{q} + \delta_0 \dot{\Phi} &= u p (\beta - \beta^*), \end{aligned}$$

де $\beta^* = p\delta_0\sigma$ – індукована крученням величина зсуву ефективного параметру неадіабатичності. Встановлено, що, під час руху доменної стінки у тривимірній спіралі під дією спін-поляризованого струму, кривина індукує появу Уокерівської границі $u_W \approx \pi\kappa / (\alpha - \beta + \beta^*)$, яка розділяє два різні режими руху доменної стінки: рівномірний ($u < u_W$) і прецесійний рух ($u > u_W$). У випадку рівномірного руху доменної стінки можна знайти її швидкість та величину фази наступним чином

$$V \approx u \frac{\beta - \beta^*}{\alpha}, \quad \sin \Phi = \frac{u}{u_W}.$$

У випадку прецесійного руху доменної стінки частота коливань її фази та положення визначається наступним чином

$$\Omega_{\text{prec}} = pu \frac{\beta - \beta^* - \alpha}{\delta_0} \sqrt{1 - \frac{u_W^2}{u^2}}.$$

З'ясовано, що кручення призводить до зсуву матеріального параметра неадіабатичності, що в свою чергу призводить до руху доменної стінки проти напрямку спін-поляризованого струму (див. Рис. 6(а)).

На третьому кроці було досліджено рух доменної стінки під дією ефективного поля Рашби. Встановлено, що у тривимірній спіралі можливий рух доменної стінки під дією поля Рашби, що неможливо у випадку прямих систем. В наближенні дуже малої кривини та кручення, знак рухливості доменної стінки визначається добутком топологічного заряду доменної стінки на кручення

$$\mu = \frac{V}{h} \approx p\sigma\kappa \frac{\delta_0}{\alpha},$$

де $h = H / (K / M_s)$ – нормоване магнітне поле (див. Рис. 6(б)).

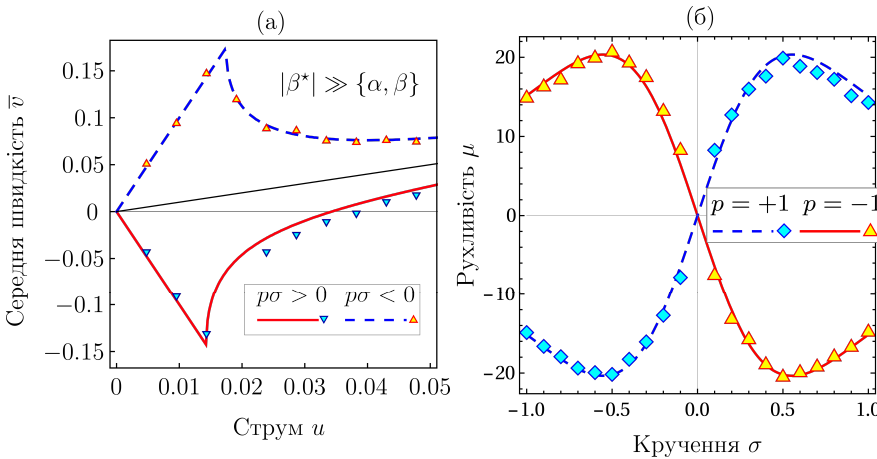


Рис. 6. (а) Середня швидкість доменної стінки, як функція струму у спіралі з кривиною $\kappa = 0.2$ і крученням $\sigma = 0.1$. Параметр неадіабатичності $\beta = 0$, релаксації $\alpha = 0.01$. (б) Рухливість доменної стінки у спіралі з кривиною $\kappa = 0.3$, як функція кручення. Маркери відповідають результатам чисельного розрахунку.

Отримані аналітичні результати добре узгоджуються з чисельними розрахунками.

У четвертому розділі чисельними методами досліджувався вплив кривини

на процес перемикання хіральності магнітного вихору у сферичних оболонках з різними кутами зрізу. Хіральність магнітного вихору перемикали за допомогою просторово-однорідного магнітного імпульсу з гаусовим часовим профілем.

Для напівсферичної оболонки знайдено область контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору в залежності від амплітуди і ширини магнітного імпульсу (див. Рис. 7(a)). Під час детального дослідження процесу перемикання хіральності магнітного вихору, встановлено, що процес зміни хіральності проходить у три етапи: (i) утворення 180° замкненої доменної стінки; (ii) 180° замкнена доменна стінка стягується до полюсу і починає там осцилювати; (iii) анігіляція 180° замкненої доменної стінки і утворення вихору з протилежною хіральністю. Сам процес анігіляції 180° замкненої доменної стінки може відбуватися за двома механізмами: (i) однорідний — замкнена доменна стінка різко стискається до розміру ядра магнітного вихору та анігілює, внаслідок чого утворюється вихор з ядром великого радіусу, який поступово повертається до початкового розміру; (ii) з утворенням вихор-антивихрових пар — замкнена доменна стінка стає нестійкою в околі полюсу півсферичної оболонки, розпадаючись на вихор-антивихрові пари. Один з новоутворених антивихорів анігілює з центральним вихором, після чого інші вихор-антивихрові пари теж анігілюють, залишаючи один вихор з протилежною хіральністю. Випадки анігіляції замкненої доменної стінки з утворенням вихор-антивихрових пар відбувається на межі між областями, де перемикання хіральності магнітного вихору відбувається і не відбувається.

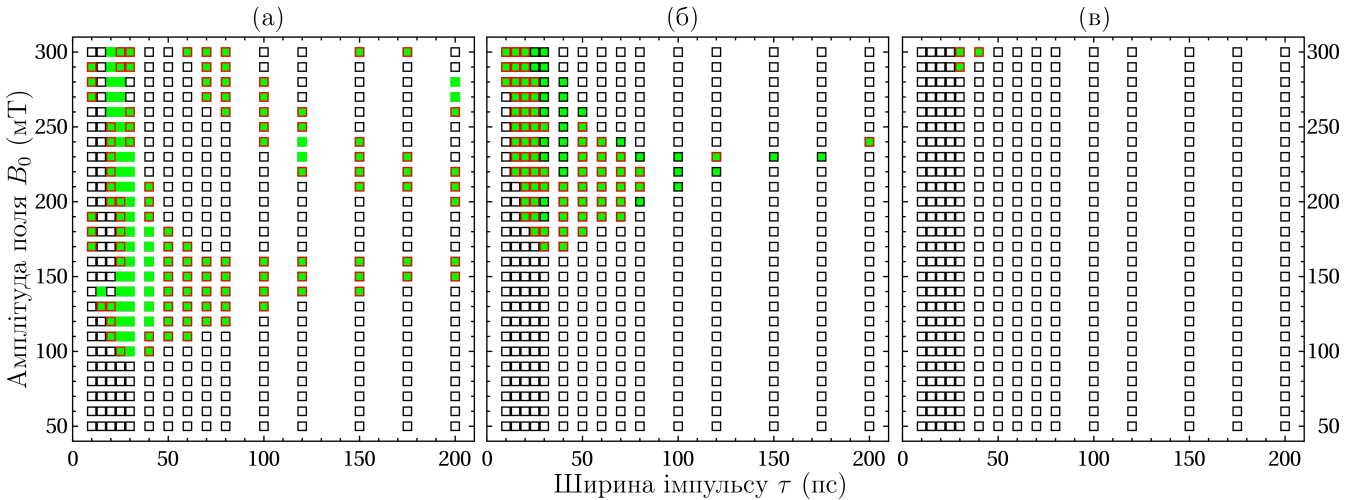


Рис. 7. Діаграми перемикання хіральності магнітного вихору на зрізаних сферичних оболонках однаковою товщини та ою'єму: (а) півсферична оболонка з радіусом $R_0 = 100$ нм; (б) зрізана сферична оболонка з кутом зрізу $\vartheta = \pi / 4$ і радіусом кривини $R \approx 1.85 R_0$, (в) диск радіусом $R_{\text{disk}} = R_0 \sqrt{2}$ і радіусом кривини $R \rightarrow \infty$. Зафарбовані і порожні маркери визначають параметри магнітного імпульсу, при яких хіральність магнітного вихору перемикається і не перемикається, відповідно.

При поступовому випрямленні викривленої оболонки до форми диску при збереженні її об'єму та товщини, встановлено, що область контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору підіймається в діапазон більших амплітуд магнітного поля (див. Рис. 7(a)-(в)).

У **висновках** підсумовуються основні результати роботи.

ВИСНОВКИ

В даній дисертаційній роботі в рамках феноменологічної моделі Ландау–Ліфшиця–Гільберта проведено теоретичний аналіз впливу криволінійних ефектів на статичні та динамічні властивості магнітної підсистеми в низьковимірних феромагнетиках.

Основні оригінальні результати можуть бути коротко сформульовані у наступній формі:

1. Аналітично знайдено рівноважний стан поперечної доменної стінки у магнітному дроті з локальним згином. Встановлено, що за наявності кривини виникає зв'язок між топологічним зарядом стінки та її фазою. Показано, що локальний згин є притягаючим потенціалом для доменної стінки.
2. У тривимірній спіралі, в залежності від геометричних параметрів, існує два рівноважні стани: періодичний (*onion*) і однорідний стани у криволінійній системі координат. Однорідний стан визначається типом анізотропії. Для квазітангенціального і квазібінормального стану неможливий розподіл намагніченості строго вздовж осі анізотропії: намагніченість відхиляється від осі анізотропії на кут, який пропорційний добутку кривини та кручення.
3. Закон дисперсії для магнонів у тривимірній спіралі зазнає асиметрії внаслідок появи кривини та кручення. У випадку легко-тангенціальної анізотропії кривина призводить до зменшення щільності у спектрі, а кручення – до лінійного, по хвильовому вектору, зсуву дисперсійної залежності.
4. Кривина призводить до появи Уокерівської границі, навіть, у випадку одновісного магнетика. Під час руху доменної стінки у тривимірній спіралі за механізмом Базалія–Жанга–Лі, кручення призводить до зсуву матеріального параметра неадіабатичності, що може призвести до руху доменної стінки проти напрямку спін-поляризованого струму. Також, у тривимірній спіралі можливий рух доменної стінки під дією ефективного поля Рашби; напрямок руху доменної стінки визначається знаком добутку топологічного заряду доменної стінки на геометричну хіральність спіралі.
5. Виявлено, що на півсферичній оболонці можливе контрольоване перемикання хіральності магнітного вихору, а використання викривлених магнітних оболонок зменшує амплітуди магнітного поля, необхідні для перемикання хіральності вихору. Знайдено область параметрів, за яких відбувається контрольоване перемикання хіральності магнітного вихору.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] Yershov K. V. *Curvature-induced domain wall pinning* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // *Phys. Rev. B.* — 2015. — Vol. **92**. —

- P. 104412.
- [2] Sheka D. D. *Torsion-induced effects in magnetic nanowires* / D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, K. V. Yershov, Y. Gaididei // Phys. Rev. B. — 2015. — Vol. **92**. — P. 054417.
 - [3] Yershov K. V. *Curvature and torsion effects in spin-current driven domain wall motion* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. **93**. — P. 094418.
 - [4] Pylypovskyi O. V. *Rashba Torque Driven Domain Wall Motion in Magnetic Helices* / O. V. Pylypovskyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, K. V. Yershov et al. // Scientific Reports (Nature publishing group). — 2016. — Vol. **6**. — P. 23316.
 - [5] Yershov K. V. *Controllable vortex chirality switching on spherical shells* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Journal of Applied Physics. — 2015. — Vol. **117**. — P. 083908.
 - [6] Yershov K. V. *Curvature Effects in Vortex Chirality Switching* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Proceedings of the X International Conference «Electronics and Applied Physics». — 2014. — Pp. 40–41.
 - [7] Yershov K. V. *Control of Chirality of Vortex Magnetization on Hemispherical Nanoshells* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Proceedings of the VI Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics». — 2014. — P. 59.
 - [8] Yershov K. V. *Domain Wall Dynamics in Parabolic Wire* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka et al. // International Conference on Magnetism. Book of Abstracts. — 2015. — Pp. Mo.K–P23.
 - [9] Yershov K. V. *Torsion Effects in a Helix Nanowire with Easy-Tangential Anisotropy* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Proceedings CD of International Young Scientists Forum on Applied Physics. — 2015. — Pp. MMM–5.
 - [10] Yershov K. V. *Domain Wall Dynamics at the Local Wire Bend* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Proceedings CD of International Young Scientists Forum on Applied Physics. — 2015. — Pp. MMM–4.
 - [11] Yershov K. V. *Curvature induced domain wall pinning at a local wire bend* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Bogolyubov Conference «Problems of Theoretical Physics». Book of Abstracts. — 2016. — P. O.20.
 - [12] Pylypovskyi O. V. *Structure and Dynamics of Domain Walls in Magnetic Helices Under the Action of the Rashba Torque*, / O. V. Pylypovskyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, K. V. Yershov et al. // Bogolyubov Conference «Problems of Theoretical Physics». Book of Abstracts. — 2016. — P. O.22.
 - [13] Pylypovskyi O. V. *Domain Wall Motion in Magnetic Helices Under Action of Rashba Torque* / O. V. Pylypovskyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, K. V. Yershov et al. // VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics». Book of Abstracts. — 2016. — P. 75.
 - [14] Yershov K. V. *Current Driven Domain Wall Motion in Magnetic Helix* / K.

V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics». Book of Abstracts. — 2016. — P. 77.

- [15] Yershov K. V. *Torsion induced negative domain wall mobility in helix nanowires* / K. V. Yershov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, Y. Gaididei // VII Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics». Book of Abstracts. — 2016. — P. O.5

АНОТАЦІЯ

Єршов К. В. Магнітні властивості викривлених низьковимірних систем – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2017.

Використовуючи феноменологічну модель Ландау-Ліфшиця-Гільберта та запис для обмінної енергії в криволінійній системі координат, аналітично передбачено ряд нових ефектів в статистиці та динаміці топологічно нетривіальних розподілів намагніченості у викривлених низьковимірних феромагнетиках. Отримано вирази для частоти власних коливань та ефективний коефіцієнт релаксації для доменної стінки на локальному згині плоского дроту. Для тривимірної спіралі побудовано діаграми рівноважних станів та отримано закони дисперсії спінових хвиль для різних типів анізотропії. Знайдено рівняння руху доменної стінки у тривимірній спіралі під дією спин-поляризованого струму. Показано, що у тривимірній спіралі можливий рух доменної стінки за механізмом Рашби. Запропоновано метод контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору на півсферичній оболонці.

Ключові слова: намагніченість, доменна стінка, магнітний вихор, викривлена геометрія.

АННОТАЦИЯ

Ершов К. В. Магнитные свойства искривленных низкоразмерных систем – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2017.

Используя феноменологическую модель Ландау-Лифшица-Гильберта и запись для обменной энергии в криволинейной системе координат, аналитически предсказано ряд новых эффектов в статике и динамике топологически нетривиальных распределений намагниченности в искривленных низкоразмерных ферромагнетиках. Получены выражения для частоты собственных колебаний и эффективный коэффициент релаксации для доменной стенки на локальном изгибе плоского провода. Для трехмерной спирали построены диаграммы равновесных

состояний и получены законы дисперсии спиновых волн для различных типов анизотропии. Найдено уравнение движения доменной стенки в трехмерной спирали под действием спин-поляризованного тока. Показано, что в трехмерной спирали возможно движение доменной стенки по механизму Рашбы. Предложен метод контролируемого переключения хиральности магнитного вихря на полусферической оболочке.

Ключевые слова: намагниченность, доменная стенка, магнитный вихрь, искривленная геометрия

ABSTRACT

Yershov K. V. Magnetic properties of curved low-dimensional systems – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The influence of curvature effects on nontrivial magnetization structures is studied theoretically and verified by numerical simulations in curved magnetic nanowires and shells within the phenomenological Landau–Lifshitz–Gilbert model.

All analytical calculations were performed for a model which takes into account only two contributions to the total magnetic energy: exchange energy and uniaxial magnetocrystalline anisotropy. The magnetostatic interaction was taken into account as an effective easy-tangential shape anisotropy with anisotropy coefficient $K_{ms} = \pi M_s^2$ with M_s being saturation magnetization (only for one-dimensional systems). All analytical results were verified with numerical simulations: (i) micromagnetic simulations using Nmag code; (ii) numerical solution of the Landau-Lifshitz equations for a discrete chain of magnetic moments. In all simulations we restrict ourselves to the case of magnetically soft material; therefore only two magnetic interactions are taken into account, namely exchange and magnetostatic contributions.

An influence of localized curvature on domain wall properties are studied by a collective variable approach. To describe statical and dynamical properties of transverse head-to-head (tail-to-tail) domain wall we use simple Slonczewski $q - \Phi$ model. For the plane curved wire it is established that a local bend of a nanowire is a source of pinning potential for a transverse head-to-head (tail-to-tail) domain wall. Eigenfrequency of the domain wall free oscillations at the pinning potential and the effective friction are determined as functions of the curvature κ . It is shown that phase selectivity takes place for the curved wires: the transverse head-to-head domain wall is always directed outward while the transverse tail-to-tail one is directed inward the bend. The pinning potential and phase selectivity originate from the effective curvature-induced Dzyaloshinskii-like term in the exchange energy.

The equilibrium magnetization states are studied theoretically and numerically for magnetic helix nanowires with different anisotropy axis: easy-tangential, easy-normal, and easy-binormal directions. There exist two equilibrium states in the helix nanowire for each anisotropy direction: state defined by the anisotropy direction, and an onion

state. In the helix nanowire with easy-tangential anisotropy for the relatively small curvature and torsion the quasitangential state is realized, and the onion state for the opposite case. It is established that curvature and torsion have influence on the spin-wave dynamics in the helix nanowire, acting as an effective magnetic field. Originated from a geometry-induced effective Dzyaloshinskii interaction, this magnetic field leads to a coupling between the helix chirality and the magnetochirality and breaks mirror symmetry in the spin-wave spectrum: the modification of magnon dispersion relation is linear with respect to the torsion σ and quadratic with respect to the curvature κ . The coupling between helix chirality and magnetochirality additionally deviates magnetization from the anisotropy direction in the case of easy-tangential and easy-binormal anisotropy. The value of deviation is defined as product of curvature and torsion. Direction of deviation is defined as sign of the product of the helix chirality and the magnetochirality.

An influence of curvature and torsion effects on domain wall motion in magnetic helix nanowires are studied by a collective variable approach. For the static domain wall it is obtained the equilibrium values. It is shown that the profiles of tangential and normal components of magnetization are defined by the topological charge of domain wall as in the plane curved wire, while the sign of binormal component is defined by product of topological charge of domain wall and helix chirality. The amplitude of binormal component is proportional to torsion and practically does not depend on curvature. Equations of motion are established for the transverse head-to-head (tail-to-tail) domain wall motion via Bazaliy-Zhang-Li mechanism. The curvature results in the appearance of Walker limit in the uniaxial wire. In the same time, torsion results in the shift of the nonadiabatic spin torque parameter, which may results in negative domain wall mobility.

Additionally, it is shown that the transverse head-to-head (tail-to-tail) domain walls can be efficiently moved in helix wires relying on the Rashba effect even in the case of the parallel charge current injection, in contrast to the case of planar systems. The velocity of domain wall motion via Rashba mechanism is quadratic with respect to the curvature and torsion, in contrast to the domain wall dynamics via Bazaliy-Zhang-Li mechanism where all effects are linear with respect to curvature and torsion. The direction of domain wall motion via Rashba mechanism is defined by sign of the product of topological charge of domain wall and helix chirality.

The influence of curvature of magnetic hemispherical shell on the process of magnetic vortex chirality switching is studied by means of micromagnetic simulations. It is shown that chirality of a magnetic vortex can be switched in controllable way by applying a Gaussian pulse of spatially uniform magnetic field along the symmetry axis of the shell. The diagram of vortex chirality switching for hemispherical shell is obtained for a big range of field amplitude and width. It is established that pulse amplitude increases drastically with the curvature radius increasing of the shell. The process of vortex chirality switching process is accompanied with nucleation and collapse of circular closed domain wall. The collapse of the circular domain wall can be attended by creation of the chain of vortex-antivortex pairs.

Key words: magnetization, domain wall, magnetic vortex, curved geometry.

Єршов Костянтин Васильович

Магнітні властивості викривлених низьковимірних систем. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 3	Формат 60 x 84/16	Обл.-вид. арк. – 1
----------	-------------------	--------------------

Підписано до друку 16.02.2017 р.	Тираж 100 прим.
----------------------------------	-----------------

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України,
03143, м. Київ, вул.. Метрологічна, 14-б

