

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

Волков Олексій Максимович

УДК 537.611

**ПЕРІОДИЧНІ СТРУКТУРИ НАМАГНІЧЕНОСТІ,
ІНДУКОВАНІ СПІН-ПОЛЯРИЗОВАНИМ
СТРУМОМ В НАНОМАГНЕТИКАХ**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка на кафедрі математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Шека Денис Дмитрович,
професор кафедри математики та теоретичної
радіофізики факультету радіофізики, електроніки
та комп'ютерних систем Київського національного
університету імені Тараса Шевченка

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Золотарюк Ярослав Олександрович,
провідний науковий співробітник відділу нелінійної
фізики конденсованого стану Інституту теоретичної
фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України
доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Тартаківська Олена Вікторівна,
старший науковий співробітник відділу теоретичної
фізики Інституту магнетизму Національної академії
наук України та Міністерства освіти і науки
України

Захист відбудеться «___» _____ 2015 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

Автореферат розісланий «___» _____ 2015 р.

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

Кузьмичев В. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Індуковані періодичні структури широко розповсюджені в природі і відіграють фундаментальну роль в різноманітних фізичних системах при переході від одного однорідного стану до іншого, крім того, утворення періодичних структур є, зазвичай, наслідком самоорганізації речовини. Одним з яскравих прикладів такої самоорганізації є утворення періодичних вихрових структур в надпровідниках II роду, Бозе—Ейнштейнівському конденсаті, надплинному гелії. В магнітних середовищах також дуже часто зустрічаються індуковані періодичні структури в розподілі намагніченості, як наприклад, смугові домени, ґратки циліндричних магнітних доменів, поперечно-вузлові доменні стінки. Ці періодичні структури виникають зазвичай при конкуренції близькодючої обмінної та далекодіючої магнітодипольної взаємодій і є стаціонарними магнітними утвореннями.

Запропонований в роботі метод отримання індукованих періодичних магнітних структур за рахунок впливу лише спін-поляризованого струму є новим. Дослідження індукованих струмом періодичних структур в ферромагнетиках має як фундаментальну, так і прикладну цінність. *Фундаментальним* є питання виникнення, стійкості та форми періодичних структур різних типів та симетрій. *Практична* цінність даних досліджень пов'язана з можливістю використання індукованих магнітонних кристалів в якості елементу спінових фільтрів в субтерагерцовому діапазоні. В роботі запропоновано методики зменшення густини струму, що необхідна для утворення періодичних структур, та досліджено вплив струм-індукованого магнітного поля на процес їх утворення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Дослідження над дисертаційною роботою були складовою наведених нижче наукових проєктів:

1. науковий проєкт «Динаміка солітонів і вихорів у наномангнетиках», підтриманий науково-дослідною роботою МОН України (державний реєстраційний номер 0108U005929, термін виконання 2010) [виконавець робіт за проєктом];
2. наукові дослідження за держбюджетною темою КНУ № 11ДФ052-06 «Надшвидкі явища в динаміці магнітних вихорів в наночастинках» (державний реєстраційний номер 0111U008886, термін виконання 2011) [виконавець робіт за проєктом];

3. науковий проект «Динаміка топологічних збурень в наномагнетиках зі складною геометрією» (державний реєстраційний номер 0113U007543, термін виконання 2013) [виконавець робіт за проектом];
4. науковий проект «Vortex-Antivortex Superlattices Induced by Spin-Polarized Current in Ferromagnetic Stripes», підтриманий Bavarian Academic Center for Central, Eastern and Southeastern Europe (BAUHOST) (термін виконання 2013) [науковий керівник проекту];
5. науковий проект «Micromagnetic calculations of the dynamics of a vortex pair in a spherical cap», підтриманий Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (реєстраційний номер проекту MA 5144/3-1, термін виконання 2013) [виконавець робіт за проектом];
6. науковий проект «Periodic Magnetization Structures Induced by a Spin-Polarized Current in Ferromagnetic Stripes», підтриманий German Academic Exchange Service (Deutsche Akademische Austauschdienst Dienst, DAAD) (реєстраційний номер проекту 91530886-FSK, термін виконання 2014) [науковий керівник проекту].

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є теоретичне дослідження впливу спін-поляризованого струму на процес насичення тонких ферромагнітних зразків різної форми та чисельне вивчення струм-індукованих періодичних структур намагніченості в цих зразках. Крім того, ставиться задача дослідити вплив додаткових магнітних полів на процеси насичення та утворення періодичних структур у ферромагнетиках під дією спін-поляризованого струму.

Об'єктом дослідження є неоднорідність розподілів намагніченості, що виникає в субмікронних ферромагнітних зразках за рахунок конкуренції між обмінною, магнітодипольною взаємодіями та спіновим крутильним моментом.

Предметом дослідження є стаціонарні розподіли намагніченості у тонких наномагнетиках скінченних розмірів та різних форм.

Методи дослідження. Всі аналітичні розрахунки виконані в рамках феноменологічної моделі Ландау—Ліфшиця—Гільберта—Слончевського—Берже з урахуванням магнітостатичної взаємодії. Для дослідження процесу насичення використовується представлення Гольштейна—Прімакова та лінійний аналіз нестійкості. Для опису стаціонарної динаміки періодичних структур намагніченості використовуються інтеграли руху та метод колективних змінних. Усі аналітичні розрахунки перевіряються за допомогою комп'ютерних моделювань, що проводились у загальнодоступному пакеті мікромагнітних моделювань OOMMF (Object Oriented Mi-

romagnetic Framework).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у якісно новому методі утворення періодичних структур намагніченості за допомогою спін-поляризованого струму, а також в дослідженні умов виникнення, характеристик та властивостей цих станів. Оригінальні результати є наступними:

1. Передбачено утворення періодичних станів намагніченості під дією поперечного спін-поляризованого струму.
2. Вперше визначено області параметрів існування кристалічних, рідких і газоподібних вихор-антивихрових фаз в плівках під дією спін-поляризованого струму. Описано область існування вихор-антивихрових кристалів в рамках лінійного аналізу.
3. За допомогою методів колективних змінних та інтегралів руху вперше описано динаміку регулярних структур.
4. Визначено вплив розмірних ефектів на утворення періодичних структур, індукованих спін-поляризованим струмом.
5. Передбачено режим «жорсткого насичення» плівки під впливом спін-поляризованого струму у присутності поперечного магнітного поля.
6. Встановлено існування неоднорідного стану насичення в наносмужках під впливом індукованого струмом магнітного поля.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання результатів дисертаційної роботи для постановки та інтерпретації експериментальних досліджень впливу поперечного спін-поляризованого струму на феромагнітні зразки. Крім того, результати, отримані в даній дисертаційній роботі, вже використовуються іншими авторами при проектуванні магнітних кристалів, як елементів фільтрів спінових хвиль.

Особистий внесок здобувача. Автор безпосередньо брав участь в постановці задачі, розробці прийомів та методів розв'язку, проведенні розрахунків та написанні статей. Основні результати, які складають зміст дисертаційної роботи, були отримані особисто здобувачем, а саме:

1. Передбачено існування вихрових кристалів в феромагнітних плівках під дією спін-поляризованого струму. Дано теоретичний опис регулярних структур в нанодисках за допомогою метода колективних змінних. Проведено чисельні моделювання структур намагніченості, аналіз критичної поведінки та чисельне дослідження стійкості структур. Опубліковано в [1].

2. Дано детальний аналіз процесу утворення вихор-антивихрових кристалів, що передує насиченню. Проведено теоретичний лінійний аналіз критичної поведінки та виконано його перевірку мікромагнітними моделюваннями. Проведено чисельний аналіз фазових переходів. Опубліковано в [2].
3. Виконано чисельне дослідження ролі розмірних ефектів в процесі утворення періодичних структур в нанодротах під дією спін-поляризованого струму. Дано опис періодичних доменних структур, передбачено утворення гістерезису в процесі насичення. Опубліковано в [3].
4. Проведено дослідження різноманітних періодичних структур намагніченості в наносмужках під дією спін-поляризованого струму за допомогою мікромагнітних моделювань. Виконано аналітичне дослідження впливу спін-поляризованого струму на вузькі наносмужки. Опубліковано в [4].
5. Дано теоретичний опис впливу поперечного магнітного поля на процес насичення феромагнітної плівки під дією спін-поляризованого струму. Зроблено розрахунок критичного струму, що забезпечує режим «жорсткого насичення», та перевірено результати за допомогою мікромагнітних моделювань. Опубліковано в [5].

Усі результати чисельних розрахунків були також отримані особисто автором.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на семінарі кафедри математики та теоретичної радіофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, на семінарі відділу квантової електроніки Інституту теоретичної фізики ім. Боголюбова, Київ; на семінарі кафедри теоретичної фізики Байройтського університету (Universität Bayreuth) та Інституті інтегрованих нанонаук (Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden), Німеччина; а також були представлені на:

1. Young Scientists' Conference «Low Temperature Physics» (Kharkiv, Ukraine, June 6-10, 2011).
2. XI International Young Scientists' Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, June 15-18, 2011).
3. VII International Conference «Electronics and applied physics» (Kyiv, Ukraine, October 19-22, 2011).
4. Young Scientists Conference «Modern Problems of Theoretical Physics» (Kyiv, Ukraine, December 21-23, 2011).
5. Young Scientists' Conference «Low Temperature Physics» (Kharkiv, Ukraine, May 14-18, 2012).

6. International Workshop “Domain microstructure and dynamics in magnetic elements” (Heraklion, Crete, April 8–11, 2013).
7. 4th International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” (Kharkiv, Ukraine, June 3-7, 2013).
8. International Conference “Problems of Theoretical Physics” (Kiev, Ukraine, December 24-27, 2013).
9. V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” (Kharkiv, Ukraine, June 2-6, 2014).
10. Humboldt Kolleg “The Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society” (Kyiv, Ukraine, June 12–14, 2014).
11. I Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics” (Kyiv, Ukraine, November 25-27, 2014).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 16 наукових праць загальним обсягом 4,7 д.а. (з них 3,3 д.а. належать особисто автору), у тому числі 5 наукових статей, опублікованих у фахових виданнях (3,7 д. а., з них 2,3 д.а. — належать автору), серед яких одна у фаховому виданні України [5] (Український фізичний журнал, Impact factor 0,18; входить до наукометричної бази даних) і чотири в іноземних наукових фахових виданнях [1–4] (Physical Review B, Impact factor 3,664; Applied Physics Letters, Impact factor 3,515; входять до наукометричної бази даних), та 11 матеріалів і тез доповідей на міжнародних наукових конференціях [6–16].

Структура дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Робота викладена на 127 сторінках машинописного тексту, із них 98 сторінок основного тексту, зі списком джерел, обсяг роботи складає 146 сторінки. Робота містить 37 ілюстрацій, з яких 16 займають окремі сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** дисертаційної роботи розглядається актуальність теми роботи, зформовано мету та задачі дослідження, продемонстровано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами та темами, представлено наукове та практичне значення роботи і отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача. Подані відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи та список опублікованих праць. Крім того, у вступі подано інформацію про об'єм, структуру та зміст дисертаційної роботи.

В **Розділі 1**, що має оглядовий характер, наводиться огляд основних теоретичних положень та результатів в галузі *наномагнетизму*, які

використовувались в подальшому дослідженні індукованих періодичних магнітних структур. Перша його частина (**підрозділ 1.1**) присвячена розгляду загальних принципів *наномагнетизму* — розділу фізики, який вивчає магнітні властивості об'єктів, що мають принаймні один вимір в нанометровому масштабі. Відтак, до області досліджень *наномагнетизму* входять ізольовані магнітні частинки, нанодиски, нанодропи, наносмужки, тонкі магнітні плівки, гетероструктури та макроскопічні об'єкти, що складаються з масивів наночастинок. Основним рівнянням для досліджень в галузі *наномагнетизму* є феноменологічне рівняння Ландау—Ліфшиця $\partial \mathbf{m} / \partial t = -\gamma [\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}]$, де вектор $\mathbf{m}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{M}(\mathbf{r}, t) / M_s$ — нормований на намагніченість насичення M_s магнітний момент одиниці об'єму \mathbf{M} , вектор \mathbf{H}_{eff} — ефективне магнітне поле, що задається як варіаційна похідна загальної енергії по намагніченості $\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\delta E / \delta \mathbf{M}$. Рівняння Ландау—Ліфшиця описує прецесію вектора намагніченості \mathbf{m} навколо напрямку дії ефективного поля \mathbf{H}_{eff} , при чому величина вектора \mathbf{m} залишається постійною і її зручно описувати сферичною системою координат $\mathbf{m} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$. Загальна енергія магнітом'якого феромагнетика, що був основним об'єктом дослідження в дисертаційній роботі, складається з двох основних частин: енергії обмінної та магнітостатичної взаємодій. Завдяки конкуренції цих двох взаємодій, в залежності від розмірів і форми феромагнетика, в ньому можуть утворюватись різноманітні топологічно нетривіальні розподіли намагніченості: *магнітні доменні стінки*, *вихори* та *антивихори*, а також, *періодичні магнітні структури*, стислому огляду яких був присвячений **підрозділ 1.2**.

В **підрозділі 1.3** представлено теоретичний огляд ефекту переносу спінового крутильного моменту, що виникає при проходженні електричного струму через багатошарову магнітну гетероструктуру, що у найпростішому вигляді складається з двох феромагнітних шарів, розділених немагнітним провідником. Завдяки спін-залежному розсіянню, електрони при проходженні через перший феромагнітний шар, що зазвичай створюється достатньо товстим, отримують вибраний напрямок поляризації спіну. Завдяки збереженню спінового крутильного моменту та релаксації зі зміною напрямку спіну, при потрапленні спін-поляризованих електронів до наступного феромагнітного шару, відбувається поворот магнітних моментів феромагнетика, що описується рівнянням Ландау—Ліфшиця—Гільберта—Слончевського—Берже:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] + \alpha \left[\mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} \right] - \gamma j \epsilon [\mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times \mathbf{p}]], \quad (1)$$

де α — стала релаксації, $j = J / J_0$ — нормована густина струму $J_0 =$

$4\pi M_s^2 |e| \hbar / \hbar$, e — заряд електрона, h — товщина зразка та \hbar — стала Планка, J — густина струму, при цьому $\varepsilon = \eta \Lambda^2 / [(\Lambda^2 + 1) + (\Lambda^2 - 1)(\mathbf{m} \cdot \mathbf{p})]$ — це функція ефективності передачі спінового крутильного моменту, де \mathbf{p} — вектор спінової поляризації в струмі при його розповсюдженні вздовж нормалі до площини наноманетику, η — ступінь спінової поляризації, а параметр Λ описує втрати між немагнітною підкладкою та зразком.

В **Розділі 2** наведено оригінальні результати дослідження процесу насичення та утворення двовимірних періодичних структур в магнітом'яких нанодисках та плівках під дією поперечного спін-поляризованого струму з напрямком поляризації вздовж вісі e_z . Зокрема, в **підрозділі 2.1**, для випадку феромагнітних нанодисків за допомогою комп'ютерних експериментів проаналізовано перехід від *вихрового стану*, що є стаціонарним станом в нанодиску за відсутності впливу струму, до *стану насичення* під дією спін-поляризованого струму. В ході даного дослідження продемонстровано наявність двох критичних густин струму: J_c , за якої вихровий розподіл в нанодиску ставав нестійким, і густини струму насичення J_s , при набутті якої феромагнітний зразок переходив до стану насичення, за якого всі вектори намагніченості були спрямовані вздовж напрямку спінової поляризації струму. Для випадку проміжних густин струму було відмічено появу різноманітних двовимірних вихор-антивихрових структур, серед яких можна виділити наступні стани намагніченості: *кристалічний стан*, що утворювався безпосередньо перед станом насичення і мав симетрію c_4 , за якої вихори та антивихори мали шаховий порядок, див. Рис. 1; *рідинний стан*, що виникав після кристалічного стану при зменшенні густини прикладеного спін-поляризованого струму і характеризувався виникненням дефектів і дислокацій у вихор-антивихрових надґратках; *газовий стан*, який з'являвся у системі після рідинного стану при зменшенні густини струму і відрізнявся хаотичною динамікою, за якої відбувалось постійне народження і анігіляція вихор-антивихрових пар. Також слід відзначити появу «розріджених» кристалічних структур різної симетрії (c_2 , c_3 , c_4 та кільце) на межі між *вихровим* та *газовим* станами. Проте, незважаючи на стійкість цих періодичних структур до локальних імпульсів магнітного поля, їх поява і тип залежали від методу дослідження впливу спін-поляризованого струму.

Через те, що періодичні вихор-антивихрові кристали виникали безпосередньо перед станом насичення, в **підрозділі 2.2** було проведено аналітичне дослідження нестійкості цього стану в нескінченних плівках за допомогою рівняння (1) та класичного аналогу представлення Гольштейна—Примакова $\psi = (m_x + im_y) / \sqrt{1 + m_z}$. У результаті було з'ясовано, що при зменшенні густини спін-поляризованого струму нижче J_s , стан

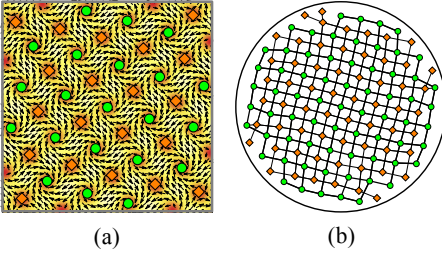


Рис. 1. (а) Центральна частина розподілу намагніченості вихор-антивихрової надґратки для пермалоевого диску ($D = 350$ нм та $h = 20$ нм) під дією струму з густиною $J = 32 \times 10^{12}$ А/м². (б) Схематичне зображення надґратки, де місця розташування вихорів та антивихорів позначено, відповідно, ● та ◆.

насичення руйнується завдяки виникненню магнітного збурення:

$$\hat{\psi}(\mathbf{k}, t) = \Psi(\mathbf{k})e^{z(\mathbf{k})t}, \quad z(\mathbf{k}) = -\frac{j\eta}{2} + \tilde{\kappa}(k), \quad (2)$$

де $\hat{\psi}(\mathbf{k})$ є Фур'є образом функції ψ , а функція $\tilde{\kappa}(k)$ має вигляд:

$$\tilde{\kappa}(k) = \sqrt{(1 - \ell^2 k^2) \left(\ell^2 k^2 + \frac{hk - 1 + \exp(-hk)}{hk} - 1 \right)}, \quad (3)$$

де ℓ — це обмінна довжин. Вираз (3) є немонотонною функцією від хвильового числа k , що розділяє області стійкості та нестійкості стану насичення. Коли функція $\tilde{\kappa}(k)$ набуває свого максимального значення, вона тим самим визначає струм насичення нескінченної феромагнітної плівки:

$$\left. \frac{d\tilde{\kappa}(k)}{dk} \right|_{k=K} = 0, \quad \kappa_s = \max_k \tilde{\kappa}(k) \equiv \tilde{\kappa}(K), \quad J_s = \frac{2M_s^2 e}{\eta \hbar} h \kappa_s. \quad (4)$$

Аналіз залежності (4) дозволив встановити залежність густини струму насичення від товщини плівки, що добре узгоджувалась з результатами мікромагнітного моделювання.

Оскільки періодичні вихор-антивихрові структури були стійкими до локальних імпульсів магнітного поля і існували впродовж всього часу дії спін-поляризованого струму на нанодиски, в **підрозділі 2.3** за допомогою інтегралів руху та методу колективних змінних записано закон збереження для двовимірних періодичних вихор-антивихрових структур. Відтак, було встановлено, що сумарна завихреність всіх вихорів, антивихорів та напівсолітонів на межі системи має бути рівна одиниці

$$\sum_{k=1}^N q_k = 1, \quad \text{як і для випадку стаціонарного вихрового розподілу} (q = 1);$$

система має обертатись як єдине ціле, з постійною кутовою частотою $\partial\Phi_k/\partial t = \text{const}$; має виконуватись умова на розташування квазічастинок, згідно з якої аналог моменту інерції всієї системи має бути рівним нулю $\sum_{k=1}^N q_k (R_k/L)^2 = 0$, де (R_k, Φ_k) — полярні координати, пов'язані з k -тою частинкою, а L — це радіус зразка. Отримані аналітичні результати добре узгоджувались з результатами мікромагнітного моделювання.

В **Розділі 3** на прикладі магнітних нанодротів та наносмужок з'ясовано вплив розмірних ефектів на утворення періодичних структур в наомагнетиках під дією поперечного спін-поляризованого струму вздовж вісі e_z . В **підрозділі 3.1** представлено результати по дослідженню впливу поперечного спін-поляризованого струму на магнітні нанодроти з квадратним поперечним перерізом. У відповідності до проведених мікромагнітних моделювань було встановлено, що аналогічно до випадку магнітних нанодисків, існує дві критичні густини спін-поляризованого струму: J_c та J_s . Відтак, за густини струму $J < J_c$ основним станом в системі був *однорідний розподіл намагніченості в площині xOy* (площина перпендикулярна до поляризації струму). При прикладанні спін-поляризованого струму вектори намагніченості здійснювали поворот на кут ϕ , що зростав при збільшенні густини струму, набуваючи свого максимального значення $\phi = -\pi/4$ при $J = J_c$, після чого однорідний стан в площині руйнувався. Коли до нанодроту була прикладена густина струму, що перевищувала J_s , система переходила до *стану насичення*. Між струмами J_c та J_s для випадку тонких нанодротів в системі утворювався *стан з періодичними доменними стінками*, а для випадку товстих нанодротів в системі мав місце *гістерезис за струмом* між двома основними станами намагніченості: однорідним станом в площині xOy та станом насичення.

У **підрозділі 3.2** розглядався вплив спін-поляризованого струму на тонкі магнітні наносмужки, в залежності від ширини яких утворювались різноманітні періодичні стани намагніченості: для найбільш вузьких смужок існував *одновимірний стан з періодичними доменними стінками*, що був аналогічний до розглянутих попередньо в нанодротах, а для найбільш широких наносмужок з'являвся *кристалічний стан*, що був аналогічним до вихор-антивихрових надґраток, що спостерігались у випадку магнітних нанодисків в **Розділі 2**. В той же час, для смужок з проміжними ширинами утворювались періодичні структури різних типів: *антивихровий ромбічний стан*, що складався з ланцюжка антивихорів вздовж середини наносмужки та напіввихорів на її межах; *стан з поперечно-вузловими доменними стінками*, що складався з ланцюжка вихорів та антивихорів, які чергувались в середині смужки; *вихровий ромбічний стан*, в якому,

аналогічно до антивихрового ромбічного стану, існував центральний ланцюжок з вихорів, що був оточений напівантивихорами на краю смужки. Крім того, безпосередньо перед станом насичення у випадку наносмужок в залежності від ширини смужки утворювались *стани з поперечними доменними стінками та повздовжніми доменними стінками*. В рамках даного дослідження, також були зроблені аналітичні розрахунки залежності густин критичного струму J_c та струму насичення J_s від ширини для випадку вузьких наносмужок. Отримані аналітичні результати добре узгоджувались з результатами мікромагнітного моделювання.

Розділ 4 був присвячений питанню впливу зовнішніх магнітних полів на процес насичення та утворення періодичних магнітних структур в наномагнетиках. В **підрозділі 4.1** було проведено дослідження впливу сталого магнітного поля, що прикладалось паралельно та антипаралельно до напрямку спінового струму та його поляризації вздовж осі e_z . В результаті проведених чисельних експериментів було встановлено, що у випадку однакових напрямків спінової поляризації струму та зовнішнього магнітного поля, струм насичення J_s в системі зменшується при збільшенні величини зовнішнього магнітного поля і прямує до нуля при наближенні до величини поля насичення. В ході даного процесу було відзначено, що стала ґратки вихор-антивихрових кристалів, які виникали безпосередньо перед станом насичення, збільшувалась при збільшенні величини зовнішнього магнітного поля, тобто вихор-антивихровий кристал ставав все більш «розрідженим». При прикладанні магнітного поля в протилежному напрямку — антипаралельно спін-поляризованому струму, густина струму насичення J_s в системі збільшувалась, а період кристалічних структур зменшувався. Подальше аналітичне дослідження нестійкості стану насичення підтвердило ці результати з великою точністю і дозволило встановити, що при будь-якій величині прикладеного поля, струм насичення не міг перевищувати деякого критичного значення, яке ми назвали *струмом «жорсткого насичення»*. При прикладанні струму більшого за струм «жорсткого насичення» стан насичення неможливо було зруйнувати, прикладаючи поперечне зовнішнє магнітне поле як завгодно великої величини.

В **підрозділі 4.2** досліджено одночасний вплив спін-поляризованого струму та струм-індукованого магнітного поля на періодичні магнітні структури в наносмужках різної ширини. Відтак, було встановлено, що більшість періодичних структур, що спостерігались раніше, з'являлись і в даній системі, не зважаючи на додатковий вплив поля Ерстеда. Проте, завдяки конкуренції даного магнітного поля та дії ефекту передачі спінового крутильного моменту на розподіл намагніченості в систе-

мі замість стану насичення з'являвся неоднорідний стаціонарний стан — *повздожня доменна стінка*, форма якої не змінювалась при збільшенні густини струму. Аналітичне дослідження даного стану, підтвердило цей факт, оскільки як і струм-індуковане магнітне поле, так і крутильний момент лінійно пропорційні до густини прикладеного струму, завдяки чому форма повздожньої доменної стінки залежала лише від матеріальних та геометричних параметрів зразка: $\theta \approx 2h/(\eta s_0)y$, де $s_0 = \Phi_0/(\pi B_s)$ — ефективна площа взаємодії, $\Phi_0 = \hbar\pi c/|e|$ — квант магнітного потоку, а B_s — величина індукції магнітного поля насичення нескінченної феромагнітної плівки. Всі аналітичні результати, що були отримані в підрозділі, добре узгоджувались з результатами мікромагнітних моделювань.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі проведено теоретичне дослідження впливу поперечного спін-поляризованого струму на феромагнітні наночастинки різної форми та розмірів. Дане дослідження засновано на феноменологічній моделі Ландау—Ліфшиця—Слончевського—Берже. Основні результати дисертаційної роботи:

1. Встановлено утворення періодичних станів намагніченості, індукованих поперечним спін-поляризованим струмом в наномагнетиках;
2. Визначено області існування кристалічних, рідких і газоподібних станів вихор-антивихрових структур в нанодисках під дією спін-поляризованого струму;
3. За допомогою класичного аналогу представлення Гольштейна—Примакова було створено лінійну теорію нестійкості стану насичення нескінченної феромагнітної плівки по відношенню до дії спін-поляризованого струму та встановлено залежність струму насичення від товщини плівки;
4. Виявлено закони збереження для регулярних двовимірних вихор-антивихрових структур в нанодисках;
5. Передбачено утворення періодичних доменних стінок в тонких магнітних нанодротах з квадратним поперечним перерізом під дією спін-поляризованого струму;
6. В товстих магнітних нанодротах встановлено існування гістерезису за струмом між двома однорідними станами намагніченості: станом з розподілом намагніченості в площині, перпендикулярній до напрямку поляризації струму, і станом насичення;
7. Передбачено існування періодичних магнітних структур в магнітом'яких наносмушках, тип яких та симетрія залежали від шири-

- ни зразка;
8. Вперше встановлено зменшення (збільшення) струму насичення при одночасній дії паралельно (антипаралельно) направлених спінової поляризації струму та сталого зовнішнього магнітного поля;
 9. Передбачено існування *струму «жорсткого насичення»* у феромагнітних плівках. При прикладанні струму більшого за струм «жорсткого насичення», стан насичення плівки неможливо було зруйнувати жодним поперечним магнітним полем;
 10. Встановлено збільшення (зменшення) періоду вихор-антивихрових кристалів, індукованих спін-поляризованим струмом, при дії паралельно (антипаралельно) спрямованого зовнішнього магнітного поля по відношенню до напрямку дії спінового струму;
 11. Передбачено утворення неоднорідного *стаціонарного стану з однією доменною стінкою* замість стану насичення в наносмужках при одночасному впливі спін-поляризованого струму та поля Ерстеда.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Volkov O. M. Spin-transfer torque and current-induced vortex superlattices in nanomagnets / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Phys. Rev. B. — 2011. — Vol. 84, № 5. — P. 052404.*
2. *Gaididei Y. Magnetic vortex-antivortex crystals generated by spin-polarized current / Y. Gaididei, O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, et al. // Phys. Rev. B. — 2012. — Vol. 86. — P. 144401.*
3. *Kravchuk V. P. Periodic magnetization structures generated by transverse spin current in magnetic nanowires / V. P. Kravchuk, O. M. Volkov, D. D. Sheka, et al. // Phys. Rev. B. — 2013. — Vol. 87. — P. 224402.*
4. *Volkov O. M. Periodic magnetic structures generated by spin-polarized currents in nanostripes / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Appl. Phys. Lett. — 2013. — Vol. 103, № 22. — P. 222401.*
5. *Volkov O. M. Saturation of magnetic films with spin-polarized current in presence of magnetic field. / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk // Ukrainian Journal of Physics. — 2013. — Vol. 58. — Pp. 667–673.*
6. *Volkov O. M. Current induced vortex lattices in nanomagnets / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Abstracts of the Young Scientists' Conference "Low Temperature Physics" — Kharkiv, Ukraine. — 2011. — P. 137.*
7. *Volkov O. M. Current induced vortex superlattices in nanomagnets / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceeding of XI*

- International Young Scientists' Conference on Applied Physics — Kyiv, Ukraine. — 2011. — Pp. 48–49.
8. *Volkov O. M.* Origin of the vortex superlattices in nanomagnets under strong spin-current influence / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceedings of the VII International Conference “Electronics and applied physics” — Kyiv, Ukraine. — 2011. — Pp. 53–54.
 9. *Volkov O. M.* Origin of the Vortex-Antivortex Superlattices in Nanomagnets / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Abstracts of the Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics” — Kyiv, Ukraine. — 2011. — P. 54.
 10. *Volkov O. M.* Origin of spin-current induced regular vortex-antivortex structures in nanomagnets / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Abstracts of the Young Scientists' Conference “Low Temperature Physics” — Kharkiv, Ukraine. — 2012. — P. 86.
 11. *Volkov O. M.* Periodical magnetization structures generated by transverse spin-current in magnetic films / O. M. Volkov // Abstracts of the International Workshop “Domain microstructure and dynamics in magnetic elements” — Heraklion, Greece. — 2013. — P. 18.
 12. *Volkov O. M.* Spin-current induced periodical structures in ferromagnetic nanowires / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceedings of the 4th International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” — Kharkiv, Ukraine. — 2013. — P. 48.
 13. *Volkov O. M.* Spin-current induced periodical structures in ferromagnetic nanostripes / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceedings of the International Conference “Problems of Theoretical Physics” — Kyiv, Ukraine. — 2013. — P. 96.
 14. *Volkov O. M.* Oersted field effects in spin-current induced structures in ferromagnetic nanostripes / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceedings of the V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” — Kharkiv, Ukraine. — 2014. — P. 75.
 15. *Volkov O. M.* Ørtsed Field Influence on Current Induced Periodical Structures in Ferromagnetic Nanostripes / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Book of Abstracts, Humboldt Kolleg “The Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society” — Kyiv, Ukraine. — 2014. — Pp. 62–63.
 16. *Volkov O. M.* Magnetisation patterning by means of electrical spin-polarised current / O. M. Volkov, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka, et al. // Proceedings of the VI Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics” — Kyiv, Ukraine. — 2014. — P. 37.

АНОТАЦІЯ

Волков О. М. Періодичні структури намагніченості, індуковані спін-поляризованими струмом в наномагнетиках – Рукопис.

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, 2015.

Використовуючи феноменологічну модель Ландау—Ліфшиця—Гільберта—Слончевського—Берже, теоретично передбачено утворення стійких періодичних магнітних структур в тонких наномагнетиках під дією спін-поляризованого струму. Створено лінійну теорію нестійкості стану насичення нескінченної ферромагнітної плівки та встановлено залежність густини струму насичення від її товщини. Виявлено закони збереження для регулярних структур, індукованих струмом у магнітних нанодисках. Досліджено вплив розмірних ефектів та зовнішніх магнітних полів на процес насичення та утворення періодичних структур намагніченості під дією спін-поляризованого струму.

Ключові слова: наномагнетик, періодичні магнітні структури, спін-поляризований струм.

АННОТАЦИЯ

Волков А. М. Периодические структуры намагниченности, индуцированные спин-поляризованным током в наномагнетиках – Рукопись.

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, 2015. Используя феноменологическую модель Ландау—Лифшица—Гильберта—Слончевского—Берже, теоретически предсказано образование устойчивых периодических магнитных структур в тонких наномагнетиках под действием спин-поляризованного тока. Создана линейную теорию неустойчивости состояния насыщения бесконечной ферромагнитной пленки и определена зависимость плотности тока насыщения от её толщины. Обнаружены законы сохранения для регулярных структур, индуцированных током. Исследовано влияние размерных эффектов и внешних магнитных полей на процесс насыщения и образования периодических структур намагниченности под действием спин-поляризованного тока.

Ключевые слова: наномагнетик, периодические магнитные структуры, спин-поляризованный ток.

ABSTRACT

Volkov O. M. Periodical magnetization structures induced by spin-polarized current in nanomagnets. – 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 the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

An appearance of stable periodical magnetization structures is predicted theoretically and verified by computer simulations in thin nanomagnets within the phenomenological Landau–Lifshitz model with an additional Slonzewski–Berger term, which describes an influence of spin-transfer torque on magnetic moments. It is established the existence of two critical currents: a saturation current J_s and a critical current J_c when a vortex distribution in nanodisk become unstable. It is shown that different vortex-antivortex structures appear between vortex and saturated states (weak and strong spin-current densities J , respectively) in nanodisks. Their structure is strongly depend on the value of J . The following magnetization states are established between J_c and J_s (in the order of decreasing of J): (i) *The vortex-antivortex crystal state* with the square lattice rotating bodily around the disk center. (ii) *Fluid-like state* which can be considered as the crystal melting process and breaking of a long-range order. (iii) *Gas-like state* characterizing by a chaotic motion of the vortex-antivortex pairs.

A linear instability of the saturation state is investigated by a classical analogue of the *Holstein–Primakoff representation* for the case of infinite magnetic film. The dependence of the J_s on film thickness is investigated both analytically and numerically. A collective variables method and integrals of motion are used for the investigation of magnetization dynamics. *Conservation laws* are established for the case of the two-dimensional periodical magnetization structures in magnetic nanodisk.

An influence of boundary effects on saturation process is investigated for magnetic nanowires and nanostripes. Contrary to the case of films, no dynamical states appear in the nanowire with a square cross-section, only stationary states exist for the whole range of current densities. For the current absence the wire is magnetized uniformly along its axis. With the current increasing the magnetization uniformly deflects from the wire axis. The deflection takes place within the plane perpendicular to the current direction and the deflection angle increase up to the value $\pi/4$ with the current increasing. For the large current densities the saturated state appears. The wire thickness is a crucial parameter for the behavior of wire magnetization: the periodical

domain walls appear for small thicknesses and a hysteresis loop appear for thick wires.

In the case of magnetic nanostripes it is investigated numerically that the saturation current $J_s(w)$ is a nonmonotonic function of the stripe width w . The dependence $J_s(w)$ tends to zero in the limit case of very narrow stripes $w \rightarrow 0$. With the width increasing $J_s(w)$ rapidly reaches its maximum value and then it demonstrates decaying oscillations which asymptotically approach the limit value J_s^{film} as $w \rightarrow \infty$, where J_s^{film} is the saturation value for an infinite film of the given thickness. The saturation process is accomplished by appearance of stable periodic structures, the type of which changes with the stripe width w : one-dimensional periodical domain walls for narrow stripes, vortex-antivortex crystal for wide stripes and cross-tie and diamond states for the intermediate range of widths.

An influence of additional external magnetic field is investigated analytically and numerically. It is established that a perpendicular magnetic field drastically changes the process of saturation of magnetic films under the action of spin-polarized current. It is shown that the saturation current J_s is decreased (increased) in the case of a co-directed (oppositely directed) magnetic field and a polarization of spin-current. There exists the critical current $J_s^{rigid} > J_s$, which provides the “rigid” saturation, namely the saturated state that is stable with respect to the transverse magnetic field of any amplitude and direction. The critical current J_s^{rigid} is determined only by material parameters (saturation magnetization) and the film thickness. It is established that the magnetic field changes the constant of vortex-antivortex lattice a_s , which appears in the pre-saturated regime: a_s infinitely increase if the approach the saturation value, and a_s decrease if the field is increased in the opposite direction.

The influence of Ørsted field on magnetic nanostripes is investigated analytically and numerically. It is established that Ørsted field does not destroy periodical magnetization structures induced by the spin-polarized current, e.g. vortex-antivortex crystal, cross-tie domain wall and vortex diamond stated. However, the action of the Ørsted field disables the saturation state for the strong currents: a stationary state with a single longitudinal domain wall appear instead. This domain wall appears as a result of competition between the Ørsted field and the spin-transfer torque in magnetic nanostripes. It is shown both numerically and analytically that shape of the single longitudinal domain wall remains constant with the current increasing and it depends only on geometrical and material parameters of the sample.

Key words: nanomagnetic, magnetic vortex and antivortex, domain wall, spin-polarized current.

Волков Олексій Максимович

Періодичні структури намагніченості, індуковані спін-поляризованим струмом в наномагнеткиах. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 8. Формат $60 \times 84/16$. Обл.-вид, арк – 1.00

Підписано до друку 10.09.2015. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України,
03680, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б.