

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Верби Романа Володимировича** на тему:
**«Спінові хвилі у надтонких магнітних плівках та наноструктурах під дією
електричного поля та струму»**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.11 — «магнетизм», фізико-математичні науки

Спін-хвильова тематика активно розробляється науковцями вже не перше десятиріччя. Але, не зважаючи на це, тут все ще залишається певне коло невирішених питань як фундаментального, так і прикладного характеру. Сьогодні фундаментальні експериментальні і теоретичні дослідження в магнетизмі стимулюються в першу чергу різноманітними практичними потребами, які тепер, умовно кажучи, переходять на наномасштабний рівень. На базі цих досліджень сформовано новий напрям в магнетизмі – магنونіка, яка є частиною і складовою, більш загального напрямку у сучасній електроніці - спіновій електроніці.

Звичайно, використання спінових хвиль як «елементарних частинок» для передачі та обробки інформації потребує розробки нових та удосконалення існуючих методів збудження та контролю спінових хвиль у магнітних функціональних матеріалах – надтонких плівках та хвилеводах. Штучні нанорозмірні структури за допомогою вибору їх геометрії, наявністю різноманітних лінійних і нелінійних ефектів дають можливість цілеспрямованої модифікації їх спектрів магнітної динаміки і потенційно мати властивості, які можуть задовольнити потреби інформаційних технологій. Дисертаційна робота Верби Романа Володимировича саме і присвячена дослідженню особливостей та характеру розповсюдження спінових хвиль у магнітоупорядкованих наномасштабних функціональних матеріалах під дією електричного поля та струму. Саме це і обумовлює актуальність теми досліджень дисертаційної роботи.

Роботи, що увійшли до дисертації, виконувалися в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт Інституту магнетизму НАН і МОН України та були підтримані міжнародними дослідницькими програмами США, програмою ЄС «Горизонт 2020» та Європейською дослідницькою радою.

Дисертація підготована у вигляді наукової доповіді. До основної частини дисертації включено 19 статей у фахових наукових журналах, які згруповано у 5 розділів. Загальний обсяг дисертації – 249 сторінок, з яких основна частина складає 194 сторінки.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне моделювання та кількісні розрахунки особливостей збудження та контролю спінових хвиль у надтонких ферромагнітних плівках та хвилеводах, дослідження особливостей лінійної та нелінійної спін-хвильової динаміки у таких структурах і вивчення можливості застосування відповідних процесів для створення функціональних елементів магنونної логіки та інших систем спін-хвильової електроніки.

Об'єктом дослідження є спінові хвилі у надтонких ферромагнітних плівках та наноструктурах.

Предмет дослідження – лінійна, параметрична та нелінійна спін-хвильова динаміка у надтонких ферромагнітних плівках та наноструктурах під впливом квазістатичних та надвисокочастотних електричних полів за рахунок ефекту електрично керованої магнітної анізотропії, а також спін-поляризованого електричного чи чистого спінового струму.

Новизна і значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі, полягають у систематичності, цілеспрямованості і науково обґрунтованості шляхів створення енергоефективних та придатних до застосування на наномасштабах способів збудження та контролю спінових хвиль (СХ) у пристроях магнітики. В роботі:

- обґрунтовано шляхи розробки нових та удосконалення існуючих енергоефективних та сумісних з нанотехнологією методів збудження та контролю СХ у надтонких магнітних плівках та хвилеводах;

- продемонстровано можливість збудження СХ у нанорозмірних феромагнітних хвилеводах електричним полем за рахунок ефекту електрично керованої магнітної анізотропії;

- запропоновано методи стабілізації амплітуди та фази СХ за допомогою параметричної накачки;

- продемонстровано способи підвищення потужності, когерентності та стабільності одномодової генерації СХ у спин-Холл осциляторах;

- розроблено методи розрахунку дисперсії, сталих затухання СХ, дипольної взаємодії між СХ, коефіцієнтів нелінійної СХ взаємодії у нанорозмірних феромагнітних хвилеводах.

Наведу приклади деяких найбільш цікавих, як на мене, результатів.

1. Запропоновано та обґрунтовано спосіб збудження СХ у надтонких феромагнітних плівках та наноструктурах електричним полем за допомогою ефекту електрично керованої магнітної анізотропії у нульовому зовнішньому магнітному полі. Продемонстровано можливість ефективного параметричного зв'язку з короткими обмінними СХ у хвилеводах з планарною намагніченістю.

2. Виявлено новий механізм обмеження амплітуд параметрично збуджених СХ локалізованою накачкою - нелінійну зміну групової швидкості СХ. Цей механізм починає відігравати суттєву роль при субмікронних та нанорозмірних довжинах області накачки.

3. Узагальнено теорію проходження СХ через внутрішню границю розділу з урахуванням можливої зміни векторної структури (поляризації) хвилі.

4. Виявлено та пояснено зменшення ефективності параметричного підсилення біжучих СХ при збільшенні їх амплітуди. Запропоновано спосіб мінімізації цього явища для збереження ефективності підсилення нелінійних СХ. Вперше виявлено ефект стабілізації амплітуди СХ локалізованою параметричною накачкою.

5. Запропоновано та обґрунтовано спосіб підвищення ефективності та завадостійкості параметричного підсилювача СХ за рахунок невзаємного зсуву спектру СХ, викликаного, наприклад, інтерфейсної взаємодії Дзялошинського-Морія, що дає змогу локалізувати холосту хвилю.

6. Вперше виявлено та досліджено особливості роботи магнітних генераторів - спин-торк та спин-Холл осциляторів - на наномасштабі. А саме:

- Визначено вплив розмірності активної області генератора, неоднорідностей густини спінового струму накачки та внутрішнього магнітного поля на особливості збудження СХ, особливості утворення стійких дисипативних дипольних магнітних солітонів, тощо;

- Надано пояснення механізму зменшення фазового шуму та збільшення області одномодової генерації у спин-Холл осциляторів з неоднорідним розподілом струму накачки;

- Вивчено вплив неоднорідного ландшафту внутрішнього статичного поля на динаміку СХ, продемонстровано можливість зміни типу збудженої моди з лінійно локалізованої на самолокалізовану нелінійну;

- Пояснено експериментальні дані по спостереженню мод нетипового профілю у СТО впливом асиметричної потенціальної ями.

7. Вперше розроблено теорію збудження біжучих СХ в одно- та двовимірних спінтрук та спін-Холл осциляторів за наявності інтерфейсної взаємодії Дзялошинського-Морія, пояснено спостережену у моделюванні червоний зсув частоти генерації та зменшення порогового струму зі збільшенням величини інтерфейсної взаємодії Дзялошинського-Морія, а також природу спіральних СХ.

Результати роботи є обґрунтованими та достовірними. Їх достовірність та обґрунтованість забезпечується тим, що результати одержані за допомогою комплексу надійно апробованих методів теоретичної та математичної фізики. Автором запропоновано адекватну інтерпретацію отриманих результатів на основі модельних розрахунків, яка не суперечить відомим із літератури даним, результати роботи відтворюють також коректні дані попередніх авторів. Слід відзначити також, що основні результати роботи опубліковані у центральних міжнародних наукових журналах з прискіпливим рецензуванням, пройшли апробацію на наукових форумах найвищого рівня. Відзначу також високий рівень англійської мови, на якій опубліковані усі роботи дисертанта.

Автореферат відображає основні результати дисертації та положення, що виносяться на захист.

До роботи є ряд зауважень. Почну з загального.

1. Фізика конденсованої речовини в даний час зазнає «другу квантову революцію» завдяки впровадженню топологічних концепцій, які використовуються для характеристики фізичних станів та властивостей системи. Топологічні ефекти впливають і на динаміку намагніченості. Прикладом топологічних ефектів в динаміці намагніченості є додаткова геометрична фаза, так звана фаза Ахаронова – Кашера [Y. Aharonov, A. Casher. *Topological quantum effects for neutral particles*. Phys. Rev. Lett. **53**, 319 (1984); Z. Cao, X. Yu, R. Han. *Quantum phase and persistent magnetic moment current and Aharonov-Casher effect in a $s=1/2$ mesoscopic ferromagnetic ring*. Phys. Rev. B **56**, 5007 (1997)]. Це додаткова фаза, що набувається при орбітальному русі нейтральних частинок з магнітним моментом у зовнішньому електричному полі. Цей топологічний квантовий феномен був безпосередньо виявлений експериментально для СХ, що поширюються в класичному магнітному ізоляторі залізо ітрієвому фериті-гранаті, $Y_3Fe_5O_{12}$ [X. Zhang, T. Liu, M. E. Flatté, H. X. Tang. *Electric field coupling to spin waves in a centrosymmetric ferrite*. Phys. Rev. Lett. **113**, 037202 (2014)]. За даними вимірювань цих авторів зміна фази СХ була на два порядки більше, ніж раніше теоретично оцінювали для центросиметричних феромагнітних ізоляторів. У наближенні першого порядку, цей топологічний ефект може бути врахованим у вигляді взаємодії Дзялошинського-Морія.

Як вже відзначалось, одна з ключових ідей дисертаційної роботи це керування властивостями СХ у надтонких феромагнітних плівках та наноструктурах зовнішнім електричним полем за рахунок ефекту електрично керованої магнітної анізотропії. Але вплив на анізотропію, це не єдиний ефект зовнішнього електричного поля на динаміку намагніченості. Як це витікає з вище названих теоретичних і експериментальних робіт, є ще і ефекти обумовлені додатковою геометричною/топологічною фазою [V. N. Krivoruchko, *Aharonov-Casher effect and electric field control of magnetization dynamics*. Low Temp. Phys. **46**, 820 (2020)]. Тобто, ефект електричного поля на динаміку намагніченості є, як мінімум, двосторонній. Крім «керованої магнітної анізотропії» електричне поле впливає ще й на фазу СХ, а значить і на дисперсію СХ.

В дисертаційній роботі цей факт на обговорюється, хоча я вважаю, що його

наявність треба було хоча би відзначити в тексті роботи.

2. Одна з поставлених і обговорюваних в роботі задач – це вчення впливу інтерфейсної взаємодії Дзялошинського-Морія на динаміку СХ. Це підрозділи 4.4, 4.5 та 5.5. Зокрема, підрозділ 5.5 узагальнює роботу Р. Krivosik, С. Е. Patton, *Hamiltonian formulation of nonlinear spin-wave dynamics: Theory and applications*. Phys. Rev. В **82**, 184428 (2010) і відповідно названий: «Узагальнення гамільтонового формалізму нелінійної взаємодії спінових хвиль на випадок несиметричних магнітних взаємодій».

Як відзначається автором у дисертаційній роботі, ключовим фактором отриманих оригінальних результатів є невзаємність спектру СХ, що викликана електрично індукованою взаємодією Дзялошинського-Морія. Але, і це неодноразово теж відзначалось у дисертаційній роботі, крім спектру СХ, суттєвим фактором для функціонування пристроїв магنونіки є ефекти згасання СХ.

Як відомо, дивись, наприклад, роботу V. G. Bar'yakhtar, A. G. Danilevich, V. N. Krivoruchko, *Magnetochiral nonreciprocity of spin wave damping in long-period structures*. Phys. Rev. В **99**, 104407 (2019), наявність взаємодією Дзялошинського-Морія також обумовлює і невзаємність згасання СХ. Нажаль, в тексті дисертаційної роботи, зокрема у підрозділі 5.5, на це не було приділено відповідної уваги. У всякому разі, вважаю, що це треба було відзначити в тексті роботи.

3. Лінійна та нелінійна динаміка намагніченості ферромагнітних плівок та наноструктурах вивчається у дисертаційній роботі в рамках рівнянь Ландау-Ліфшиця. Проте, як відомо, у рамках цього підходу не враховуються повздовжні коливання намагніченості, хоча ці, повздовжні коливання намагніченості теж мають місце і це відзначається автором дисертації (див., наприклад, розділи 4.1 та 5.1). На мій погляд, динамічні властивості такого типу системи цікаво було б проаналізувати в рамках підходу/рівнянь Ландау-Ліфшиця-Бар'яхтара [В.Г. Бар'яхтар, *Феноменологическое описание релаксационных процессов в магнетиках*, ЖЭТФ **87**, 1501 (1984)], тоб-то, з урахуванням повздовжніх коливань намагніченості.

4. Теоретичні методи, що використовуються у дисертаційній роботі при вивченні параметричної та нелінійної динаміки СХ у надтонких ферромагнітних плівках та наноструктурах, зокрема такі як у роботі Р. Krivosik, С. Е. Patton, це гамільтонів формалізм та класичне перетворення Голстейна-Примакова для спінових операторів, тобто перехід від спінових операторів до Бозе операторів за Голстейном-Примаковим. І тут я би хотів підкреслити важливу, на мій погляд, особливість спінових операторів, на яку, на жаль у сучасному тренді під назвою «магنونіка», не звертають достатньо уваги, хоча ця особливість є ключовою, коли мова йде про параметричне збудження СХ, надшвидке перемагнічування, бозе конденсат спінових хвиль, температурні ефекти і таке інше. Річ у тому, що як відомо, спінові оператори це не Бозе і не Фермі оператори, і ця особливість стає суттєвою, коли мова йде про велику кількість збуджених магنونів.

Наведу конкретний приклад з дисертаційної роботи: сторінка 233, рівняння (4.7). Доданок $T_k|c_k|^2$ до енергії спінової хвилі у рівнянні (4.7) це вклад від чотирьох-магنونної взаємодії і фактично є $T_k n(k)$, де $n(k)$ – число заповнення магنونів з енергією $\epsilon(k)$. На малюнку 2, сторінка 234, наведено приклад обчислення спектру СХ з $|c_k| = 0.8$, але це вже така кількість магنونів, коли відмінність спінових збуджень від збуджень Бозе частинок може бути суттєвою.

На сьогодні вже існують теоретичні підходи, де ці статистичні особливості спінових операторів можуть бути коректно враховані, див., наприклад, В.Г. Бар'яхтар, В.Н. Криворучко, Д.А. Яблонский. *Функции Грина в теории магнетизма*. Киев, Наукова думка (1984).

Отже, я вважаю, що, по-перше, цю особливість статистики СХ треба було б відзначити в тексті дисертаційної роботи, а по друге – надати оцінки з цієї точки зору на

точність і область застосування отриманих результатів по температурі, ступеня інтенсивності параметрично збуджених СХ, тощо.

Втім, зазначені вище зауваження не впливають на достовірність отриманих наукових результатів і загальну позитивну оцінку представленій до захисту дисертаційної роботи, і можуть значною мірою розглядатися як побажання і предмет майбутньої наукової роботи.

Мета, задачі та предмет досліджень дисертаційної роботи, використані методики досліджень, основні наукові положення та висновки роботи відповідають паспорту спеціальності 01.04.11 – магнетизм. В цілому, дана дисертаційна робота є закінченою науковою працею, яка вносить суттєвий вклад у фізику магнітних явищ, а одержані результати відкривають цілий ряд нових можливостей у магнетизмі, зокрема, щодо можливостей керування елементарними збудженнями в наноструктурованих магнітних матеріалах

Враховуючи викладене, вважаю, що дисертаційна робота «Спінові хвилі у надтонких магнітних плівках та наноструктурах під дією електричного поля та струму», відповідає вимогам ВАК України, щодо докторських дисертацій, а її автор, Верба Роман Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 - магнетизм, фізико-математичні науки.

Доктор фізико-математичних наук, професор,
заступник директора з наукової роботи
ДонФТІ ім. О.О. Галкіна НАН України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки



Криворучко В.М.