

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Верби Романа Володимировича

“Спінові хвилі у надтонких магнітних плівках та наноструктурах

під дією електричного поля та струму”,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному вивченню збудження та динаміки спінових хвиль у тонких феромагнітних плівках, наносмужках, та наноструктурах. Актуальність досліджень пов’язана зі значними перспективами використання спінових хвиль для створення новітніх пристроїв обробки інформації та надвисокочастотних сигналів. Справді, такі властивості спінових хвиль, як низькі втрати безпосередньо в магнітній підсистемі, легкість статичного та динамічного маніпулювання дисперсією хвиль, велика різноманітність параметричних та нелінійних ефектів, тощо, можуть, в перспективі, дозволити створити пристрої з функціональними властивостями та/або характеристиками, недосяжними для класичної технології кремнієвих інтегральних схем.

Хоча спін-хвильова динаміка і методи обробки спін-хвильових сигналів вивчаються майже пів сторіччя, конкурентноспроможних характеристик спін-хвильових пристроїв можна досягти тільки при переході до субмікронних та наномасштабів, на яких спін-хвильова динаміка виявляє суттєві особливості, що призводить до необхідності розробки нових методів та підходів. Однією з першочергових проблем при розробці нанорозмірних спін-хвильових пристроїв є потреба розробки енергоефективних методів збудження спінових хвиль та впливу на їх розповсюдження, придатних для застосування на відповідних масштабах. Дослідженню цієї проблеми та пошуку шляхів її вирішення і присвячена дисертаційна робота Верби Р.В.

Для вирішення вищезазначеної проблеми автором було запропоновано використати нещодавно відкритий магнітоелектричний ефект – ефект електрично керованої магнітної анізотропії (ЕКМА), який проявляється у надтонких провідних феромагнітних плівках та наноструктурах і до робіт автора досліджувався з точки зору фундаментальної фізики та застосування у пристроях магнітної пам'яті. Крім того, у дисертації розглянута спін-хвильова динаміка під впливом ефекту спін-трансферу, який теж цікавий для застосувань саме у нанорозмірних магнітних пристроях. Попри значний обсяг раніше проведених досліджень, автору вдалось знайти нові аспекти спін-хвильової динаміки під впливом спін-трансферу, актуальні з точки зору покращення характеристик існуючих та створення нових спінтронних пристроїв.

У дисертаційній роботі отримано ряд нових наукових результатів, які визначають новизну дисертаційної роботи, серед них хотілось би відзначити наступні:

1. Запропоновано та обґрунтовано, а також експериментально підтверджено спосіб збудження спін-хвильових мод у надтонких феромагнітних хвилеводах та наноструктурах мікрохвильовим електричним полем за допомогою ефекту ЕКМА у нульовому зовнішньому магнітному полі. При цьому продемонстровано більшу ефективність процесу збудження у хвилеводах зі статичною намагніченістю в їх площині, яка, крім того, залишається високою і для коротких обмінних спінових хвиль.
2. Продемонстровано суттєвий вплив зміни поляризації спінових хвиль при проходженні області з іншою анізотропією, в тому числі, наведеною електричним полем за рахунок ефекту ЕКМА. Узагальнено теорію проходження спінових хвиль через внутрішню границю розділу з урахуванням цієї зміни.
3. Запропоновано спосіб нормалізації амплітуди спінових хвиль за рахунок використання нелінійного режиму роботи параметричного

підсилювача, а також спосіб корекції фазових помилок спінових хвиль за допомогою взаємодії з неадіабатичною параметричною накачкою.

4. Виявлено та досліджено утворення стійких дисипативних дипольних магнітних солітонів – дипольних спін-хвильових булетів – у квазіодновимірних магнітних осциляторах на основі ефекту спін-трансферу. Продемонстровано вплив неоднорідності густини струму накачки на динаміку цих солітонів, за рахунок якої можна досягти підвищення стійкості та когерентності одномодової генерації в осциляторах.

У підсумку, одержані результати окреслюють новий шлях вирішення поставленої проблеми створення енергоефективних способів збудження та контролю спінових хвиль на наномасштабах. Оцінки, зроблені у дисертації, показують ефективність цього шляху, зокрема, можливість зменшення паразитних втрат у перетворювачах електричних сигналів у спін-хвильові до рівня, меншого за втрати безпосередньо у магнітній підсистемі. Також, одержані результати демонструють способи покращення характеристик та надання додаткової функціональності магнітним наногенераторам на основі ефекту спін-трансферу.

Крім того, робота має також суттєву методологічну цінність – у ній розроблено метод розрахунку сталих дисипації спінових хвиль за наявності різноманітних дисипативних механізмів, метод розрахунку характеристик спрямованого відгалужувача на основі дипольно взаємодіючих нанорозмірних хвилеводів у лінійному та помірно нелінійному режимах роботи, узагальнено метод аналізу нелінійної спін-хвильової взаємодії на основі гамільтонового формалізму на випадок наявності антисиметричних взаємодій, наприклад, активно досліджуваної на сьогодні поверхневої взаємодії Дзялошинського-Морія.

Достовірність отриманих у роботі результатів забезпечується широким порівнянням одержаних теоретичних результатів з експериментальними даними

та/або результатами мікромагнітного моделювання, як отриманими співавторами публікацій, так і даними з літератури.

Дисертація підготована у вигляді наукової доповіді за сукупністю публікації і складається зі вступу, основної частини з п'яти розділів, у яких послідовно і повною мірою викладені й обґрунтовані всі наукові результати, винесені у висновках дисертації. Особистий внесок здобувача в отримання результатів чітко окреслений як у вступі, так і в передмовах до розділів основної частини дисертації. Автореферат достатньою мірою відображає зміст дисертації. Усі результати досліджень, винесені на захист, своєчасно і повно опубліковані у наукових фахових виданнях з високим імпаکت-фактором та пройшли належну апробацію на міжнародних конференціях. За змістом дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.04.11 – магнетизм.

До роботи є ряд зауважень:

1. При обговоренні параметричного збудження спінових хвиль у випадку перпендикулярно намагніченої плівки (підрозділ 1.1) вказано, що ефективність параметричної взаємодії залежить від еліптичності прецесії намагніченості, яка, в свою чергу, визначається анізотропією форми наносмужки. На мою думку, було б доцільно детально описати залежність ефективного поля анізотропії від геометричних параметрів наносмужки, чого немає в дисертації.
2. У підрозділах 1.2 та 3.1 розглядається нелінійна стадія збудження та підсилення спінових хвиль параметричною накачкою. При цьому, для опису даних моделювання використовуються дещо різні моделі - у 1.2 додатково враховується нелінійний зсув групової швидкості хвиль, а в 3.1 модифікується коефіцієнт 4-магнетонної взаємодії. Із тексту не зрозуміло, чому використовуються різні моделі, адже обидва процеси стосуються нелінійної динаміки спінових хвиль під впливом параметричної накачки.
3. У підрозділах 1.2 та 3.1, при описі теоретичної моделі наведено лише чотирихвильову частину гамільтоніану, а не повний вираз з усіма

доданками, врахованими в моделі. Це ускладнює розуміння меж застосування теорії. Те ж саме зауваження стосується опису результатів в авторефераті.

4. У підрозділі 2.2 показано особливості відбиття та проходження спінових хвиль у геометрії поверхневих хвиль і необхідність врахування симетрії дипольних полів хвилі. У той же час, у підрозділі 3.3 розглядається параметрична динаміка спінових хвиль у такій же геометрії, але для опису використовуються тільки рівняння для огинаючих амплітуд хвиль, а особливості їх дипольних полів, принаймні в явному вигляді, не враховані. Із тексту не зрозуміло, з чим пов'язаний такий різний підхід і наскільки є справедливою модель у другому випадку.

5. Мікромагнітні моделювання у роботі виконані із використанням різних програм – частина виконана за допомогою широковідомого пакету Mumax3, а частина – програмою GPMagnet. Із тексту дисертації не зрозуміло, чим обумовлений такий вибір, чи є якісь обмеження чи переваги при використанні однієї чи іншої програми моделювання.

6. Із тексту на сторінці 13 автореферату дуже складно прослідкувати природу появи коефіцієнту  $C$  та підстави, чому його можна наближено можна вважати рівним  $C = 2$ .

Наведені зауваження, однак, не ставлять під сумнів наукову новизну та достовірність основних результатів дисертаційної роботи. Загалом, дисертаційна робота Верби Р.В. виконана з дотриманням всіх вимог, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук згідно “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами) та Наказу МОН України “Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” від 23.09.2019р. № 1220.

У підсумку, вважаю, що Верба Роман Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук, професор,

перший проректор

Університету економіки та права "КРОК"

А.М. Кучко

Нідписо А.М. Кучко засвідчук  
Директор департаменту кадрів Вищого навчального закладу  
Університету економіки та права "Крок"  
М.М. Мисюк  
березень 20 21 р.