

## 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.

Нанофізика, нанотехнології та наноелектроніка – це сучасні тренди як фундаментальної, так і прикладної фізики. Одним з напрямів, які оформилися за останні приблизно 15 років, є магніоніка. Це одна з активно досліджуваних областей сучасної фізики надвисокочастотного магнетизму, орієнтована на створення альтернативи сучасній електроніці шляхом заміни зарядових струмів на чисто спінові струми, носіями яких є дипольно-обмінні спінові хвилі, розробку відповідних аналогів електронних елементів та пристроїв.

Досягнення у технології виготовлення наноструктурованих феромагнітних та феримагнітних матеріалів, відкриття ряду нових ефектів у магнітних нано- та гетероструктурах, суттєво підвищили перспективи застосування спінових хвиль для створення новітніх систем обробки інформації, зокрема, частково, показали принципову досяжність таких характеристик магніонних пристроїв, які б могли конкурувати з існуючими аналогами напівпровідникових елементів, приладів і систем.

Перехід до субмікронних та наномасштабних розмірів, однак, потребує суттєвого доопрацювання розроблених раніше теоретичних засад збудження, генерації, поширення, підсилення, прийому та обробки спін-хвильових сигналів. Іноді, спін-хвильова динаміка на таких масштабах проявляє суттєві відмінності порівняно з мікромасштабами і потребує принципово інших методів обробки інформації.

Однією з таких ключових наукових проблем є необхідність розробки енергоефективних та придатних для використання на наномасштабах методів збудження спінових хвиль та методів впливу на їх поширення, оскільки розвинені раніше способи із використанням магнітних полів електричних струмів зводять нанівець переваги нанорозмірних магніонних пристроїв, в першу чергу, з точки зору енергоефективності. Вирішенню цієї актуальної проблеми розвитку магніоніки і присвячена дана дисертаційна робота.

Основний акцент у дисертаційній роботі зроблений на теоретичні дослідження можливості застосування новітнього магнітоелектричного ефекту — ефекту електрично керованої магнітної анізотропії (ЕКМА) у надтонких провідних феромагнітних плівках та наноструктурах. Ідея використання ефекту

ЕКМА у магнетонних пристроях, сформульована за участі автора дисертації, виявилась життєздатною, що показали теоретичні розрахунки та, частково, експерименти, зроблені у співпраці з автором дисертації.

Автором, загалом, у дисертації зроблено акцент на використанні паралельної параметричної накачки при роботі з нанорозмірними плівками та хвилеводами спінових хвиль на їх основі, коли яскраво проявляється домінуюча роль обмінної взаємодії.

У роботі також розглянуті окремі практично важливі особливості спін-хвильової динаміки у рамках ефекту спін-трансферу та спін-Холл ефекту. Ці ефекти лежать в основі функціонування наноосциляторів мікрохвильового діапазону.

Дисертація підготовлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю публікацій, її основна частина складається з п'яти розділів.

У першому розділі розглянуто можливість та механізми збудження спінових хвиль НВЧ електричним полем за допомогою ефекту ЕКМА. Теоретично показано, що за відсутності зовнішнього статичного магнітного поля, що є дуже бажаним для практичних застосувань, збудження спінових хвиль можливе за механізмом параметричного збудження. Серед інших результатів варто відзначити встановлення іншого типу параметричного зв'язку НВЧ модульованої анізотропії зі спіновими хвилями у випадку наносмужки, намагніченої вздовж своєї осі, ефективність якого пропорційна відношенню динамічних компонент намагніченості, а не еліптичності прецесії, як у випадку класичної паралельної параметричної накачки. Такий тип зв'язку залишається ефективним і для коротких обмінних спінових хвиль, що є важливим для створення нанорозмірних пристроїв магнетоники.

У другому розділі розглянуто особливості контролю амплітуди та фази спінових хвиль за допомогою прикладання локального електричного поля. Виявлені якісні відмінності у закономірностях проходження спінових хвиль, які проявляються саме при локальній зміні анізотропії та пов'язані зі зміною векторної структури спінових хвиль. Продемонстровано, що ці відмінності необхідно враховувати при розробці електрично керованих пристроїв магнетоники. Крім того, продемонстровані суттєві якісні відмінності поширення спінових хвиль у геометрії поверхневих хвиль, а саме вказано на підвищену стійкість до розсіяння, яка, досить неочікувано, сильніше проявляється у тонких плівках та хвилеводах, у яких поверхнева локалізація хвиль практично відсутня.

У третьому розділі розглядається взаємодія біжучих спінових хвиль з параметричною накачкою. Хоча ці процеси давно вивчаються, автору вдалось знайти суттєві особливості, які проявляються саме у нанорозмірних хвилеводах. Завдяки сильній розрідженості спектру у таких хвилеводах можливе поширення

спінових хвиль великої амплітуди, за якої суттєву роль у параметричному процесі починає відігравати чотиримагнонна взаємодія, зменшуючи ефективність параметричного підсилення сигнальної хвилі. У дисертації знайдено спосіб мінімізації цього явища для збереження ефективності підсилення, а також запропоновано використання нелінійного режиму роботи параметричного підсилювача для нормалізації амплітуди спінових хвиль, що є необхідною операцією для об'єднання окремих елементів магнонної логіки в інтегровані кола. Також запропоновано оригінальний спосіб підвищення ефективності та мінімізації паразитних впливів у параметричному підсилювачі за рахунок використання невзаємного зсуву спектру спінових хвиль, спричиненого взаємодією Дзялошинського-Морія.

У четвертому розділі пояснено ряд важливих з практичної зору експериментів по збудженню спінових хвиль та коливань спін-поляризованим або чистим спіновим струмом. Серед іншого, пояснено механізм стабілізації когерентної одномодової генерації у квазіодновимірних магнітних автогенераторах мікронних розмірів, що відкриває шлях до збільшення потужності та когерентності генерації. Цікаво, що збудженою модою у цьому випадку виявився недосліджений раніше тип магнітних солітонів — великоамплітудні дисипативні дипольні солітони. Також пояснено спосіб подальшого підвищення когерентності та стабільності генерації шляхом введення нерівномірності густини спінового струму накачки в активній зоні осцилятора, що є простим та елегантним для реалізації методом.

У п'ятому розділі розглянуті питання властивостей спінових хвиль у нанорозмірних ферромагнітних хвилеводах, поглиблене розуміння яких також є необхідним для розробки та впровадження магнонних пристроїв. Зокрема, розроблені методики розрахунку сталих затухання спінових хвиль за наявності неоднорідних чи/та нелокальних дисипативних механізмів, які стають особливо актуальними для нанорозмірних систем, метод розрахунку лінійних та помірно нелінійних характеристик спін-хвильового відгалужувача на основі дипольно взаємодіючих хвилеводів.

У підсумку, одержані результати теоретично обґрунтовують можливий шлях вирішення поставленої проблеми створення енергоефективних та придатних до застосування на наномасштабах способів збудження та контролю спінових хвиль у пристроях магноники, а також покращення характеристик та надання додаткової функціональності магнітним наногенераторам на основі ефекту спін-трансферу.

У то той же час робота не позбавлена недоліків:

1. Нечітко сформульована вирішена наукова проблема, хоча з результатів наведених у дисертації випливає, що автор теоретично вирішив проблему

адаптації теорії спінових хвиль у основних її аспектах до феро- та феримагнітних субмікронних та наноструктур, використовуючи методи аналітичної теорії та комп'ютерного моделювання.

2. Ефект ЕКМА, представлений у підрозділах 1.1, 1.2, 1.3 та інших базується на дуже спрощеній схематичній моделі, яка є далекою від такої, що може слугувати для кількісних оцінок та бути запропонована експериментаторам. У теорію закладені теоретичні оцінки напруженості електричного поля порядку  $1\text{В/нм}$ , які відповідають внутрішнім кристалічним полям, а тому зрозуміло, що ефект має бути сильним і не піддається сумніву. Інша справа, що практично реалізувати такі поля у приповерхневому шарі заліза неможливо. Левова частка різниці потенціалів прийдеться на діелектричний шар  $\text{MgO}$ , а не на провідний приповерхневий шар заліза. Крім того, такі поля призведуть до електричного пробоя між контактами через повітря, а спроби зменшити товщину діелектричного шару призведуть до протікання тунельного струму.
3. Автор належить до того покоління науковців, яким практично невідомі дослідження опубліковані у російськомовних виданнях 70-х та 80-років, оскільки вони відсутні у сучасних електронних базах. Одним із прикладів є піонерська робота В.П. Лукомського (УФЖ, 1978, т.23, №1, с.134-139), яка певним чином, перегукується з дослідженнями представленими у підрозділі 2.2. Ця та інші роботи мали б бути процитованими і обговореними. Сучасність публікацій, іноді, не говорить про новизну представлених там результатів.
4. Твердження щодо нульової та від'ємної групової швидкості спінових хвиль на с.21, 23 автореферату не спираються на поглиблене розуміння цього поняття, яке може використовуватись у випадках слабкої дисперсії та спектрально вузьких сигналів (С.В.Герус и др. Известия РАН. Серия физическая, 2020, т.84, №2, с.178-180 та інші роботи Е.Г.Локка, опубліковані в УФН).
5. Автореферат написаний не дуже охайно, містить різного типу описки та неправильні переноси слів.

Незважаючи на вказані недоліки, представлені на захист теоретичні результати можна вважати достатніми для вирішення наукової проблеми, на якій зосередився автор – Верба Роман Володимирович.

Достовірність отриманих у роботі результатів частково забезпечується порівнянням одержаних теоретичних результатів з експериментом та/або результатами мікромагнітного моделювання.



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.

Варто відзначити достатньо активне цитування опублікованих за тематикою дисертації праць, сукупний h-індекс яких дорівнює десяти, що ще раз підтверджує своєчасність та актуальність досліджень, представлених у дисертації.

Зміст автореферату і основні положення дисертації ідентичні.

Дисертаційна робота Верби Романа Володимировича відповідає вимогам “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, які висуваються до докторських дисертацій.

Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук, професор,  
професор кафедри квантової радіофізики  
факультету радіофізики, електроніки та  
комп’ютерних систем Київського національного  
університету імені Тараса Шевченка

*Zab*

І. В. Зависяк

Підпис засідателя  
Вчений секретар НДЧ  
Караульна Н.В.  
24.05.2021р.



*[Handwritten signature]*