

РЕФЕРАТ

роботи “Фізичні принципи спін-хвильової електроніки та спінтроніки”,
поданої на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки у 2021 р.

Автори: *Р. В. Верба, В. О. Голуб, Г. М. Каказей, Г. А. Мелков,
О. О. Серга, О. І. Товстолиткін, А. В. Чумак, Д. Д. Шека*

1. Вступ

Невпинно зростаючі обсяги передачі та обробки даних та інформатизації суспільства постійно підвищують потребу подальшого розвитку елементної бази інформаційних та комунікаційних технологій, роблячи акцент на їх швидкодії, енергоефективності та доступності для масового виробництва. Це спонукає не тільки розвивати існуючу технологію кремнієвих інтегральних схем, яка ще не вичерпала своїх можливостей, хоча все частіше зустрічається із суттєвими труднощами та фундаментальними обмеженнями, а й проводити дослідження і розробки альтернативних підходів, від розробки нової елементної бази класичних обчислювальних систем на основі двійкової логіки до принципово нових підходів в обробці інформації та сигналів: апаратних нейронних мереж, хвильових методів обчислень, квантових обчислень, тощо.

Одними з таких перспективних напрямів є спін-хвильова електроніка та спінтроніка. Основною ідеєю цих напрямів є використання спіну та колективних збуджень спінового стану – спінових хвиль – для запису та обробки інформації. Головними перевагами цього підходу є: (1) низькі втрати в магнітній системі порівняно з омичними втратами електричних струмів у класичних системах, що відкриває шлях до створення елементів з наднизьким енергоспоживанням; (2) принципова можливість суттєвої мініатюризації спін-хвильових та спінтронних пристроїв до десятків та одиниць нанометрів; а також (3) велике різноманіття параметричних та нелінійних ефектів у магнітних структурах, які, як, зокрема, показано в роботі, дозволяють реалізувати не лише операції класичної двійкової логіки, а й складні функціональні операції обробки аналогових сигналів, та застосовувати небулеві підходи до обчислень, в тому числі, нейроморфні підходи.

Розвиток спін-хвильової електроніки розпочався у другій половині ХХ сторіччя після відкриття та освоєння технології виготовлення монокристалів залізо-ітрієвого гранату, магнітодіелектрика з рекордно низькими магнітними втратами, а бурхливому розвитку спінтроніки сприяло відкриття Нобелівськими лауреатами А. Фертом та П. Грюнбергом ефекту гігантського магнітоопору. Успішність описаного підходу підтвердило найширше впровадження феритових пристроїв та спінтронних структур у техніку надвисоких частот та пристрої магнітної пам'яті, відповідно.

Дана робота відноситься до нової хвилі розвитку спін-хвильової електроніки та спінтроніки, яка розпочалась у ХХІ сторіччі і пов'язана зі стрімким розвитком технологій виготовлення спочатку мікро-, а згодом і нанорозмірних магнітних структур. Необхідно підкреслити, що перехід до мікро- та, особливо, наномасштабів не можна звести до простого масштабування раніше досліджених явищ. За таких розмірів з'являються принципово нові явища та характеристики, такі як однодомений та односолітонний стан магнітних структур, дискретизація спін-хвильового спектру, відбувається перехід від магнітостатичних спінових хвиль до дипольно-обмінних та переважно обмінних спінових хвиль, радикально підвищується роль різноманітних поверхневих та міжфазних ефектів, тощо. Хоча ці властивості магнітних мікро- та наноструктур спричиняють труднощі, а часом накладають

фундаментальні обмеження на застосування раніше розвинених підходів на малих просторових масштабах, вони, водночас, відкривають можливості для розробки принципово нових, часто значно ефективніших підходів до запису та обробки інформації та сигналів у пристроях спінтроники та спін-хвильової електроніки.

Метою даної роботи є вивчення фундаментальних фізичних ефектів – підґрунтя для розробки новітніх мікро- та нанорозмірних пристроїв спін-хвильової електроніки та спінтроники, розвиток фізичних принципів створення таких пристроїв, а також створення і дослідження нових магнітних матеріалів для цих потреб. Робота охоплює широкий спектр новітніх явищ і матеріалів спінтроники та спін-хвильової електроніки. До неї увійшли розробки та дослідження функціональних матеріалів спін-хвильової електроніки – мікро- та наноструктурованих магнетонних кристалів, розробки принципів та дослідження перших прототипів елементів спін-хвильової логіки, серія піонерських досліджень параметричної динаміки спінових хвиль та реалізацій за їх допомогою різноманітних операцій обробки аналогових та цифрових сигналів, розробки теоретичних основ магнетизму та магнітної динаміки у тривимірних криволінійних магнітних наноструктурах, а також дослідження новітніх матеріалів та наноструктур для спінтронних застосувань.

2. Зміст роботи та основні результати

2.1. Магнетонні кристали — штучні середовища спін-хвильової електроніки

Важливий клас матеріалів сучасної спін-хвильової електроніки складають штучні магнетонні кристали, побудовані на основі явищ брегівської дифракції або колективізації коливань у впорядкованих ґратках магнітодипольно зв'язаних магнітних елементів. Такі кристали дозволяють модифікувати існуючі чи навіть задавати відсутні в природних середовищах характеристики спінових хвиль. Це відкриває шлях до створення систем передачі та обробки інформації, в яких контрольоване одно-, дво-, або навіть тривимірне поширення спінових хвиль може бути суміщене з лінійними та нелінійними операціями над транспортованими ними сигналами. Для обробки інформації в режимі реального часу та для побудови адаптивних інформаційних систем необхідні динамічні та керовані кристали. Авторами роботи розроблено та досліджено широкий спектр різних типів мікро- та нанорозмірних магнетонних кристалів.

2.1.1. Статичні магнетонні кристали на основі структурованих магнітних плівок. У роботі створено та детально вивчено цілий ряд магнетонних кристалів на основі модульованих та структурованих фери- та феромагнітних плівок, що використовують явище брегівської дифракції. Було продемонстровано, що травлення ґраток паралельних жолобків на поверхні феромагнітних плівок мікронних товщин є простим та високоефективним методом виготовлення статичних магнетонних кристалів. Експериментально та теоретично досліджено, а також оптимізовано процеси розсіяння поверхневих та об'ємних магнітостатичних хвиль в жолобковому магнетонному кристалі. Методами ширинної модуляції та іонної імплантації металевих спін-хвильових хвилеводів нанометрових товщин створено мікророзмірні магнетонні кристали. Статичні магнетонні кристали було успішно застосовано для фільтрації спін-хвильових мод в колі позитивного зворотного зв'язку спін-хвильового надвисокочастотного генератора. Вони були використані як основа розроблених авторами магнетонного транзистора, логічного вентиля, а також комірки пам'яті, призначеної для збереження і наступного параметричного відновлення надвисокочастотних сигналів.

2.1.2. Динамічні та керовані магнетні кристали. Важливою особливістю магнетних матеріалів є можливість швидкої зміни їх властивостей. Ця властивість дозволила розробити динамічні та швидкодіючі керовані магнетні кристали. У роботі розроблено нанорозмірний кристал, керований електричним полем. Реалізовано кристал, в якому намагнетненість магнетної плівки змінювалась методом лазерного нагріву. Створено принципово новий тип магнетного кристала – контрольований електричним струмом динамічний кристал, властивості якого можуть бути змінені на часових проміжках, коротших за час поширення спінових хвиль через його структуру. Використовуючи динамічний магнетний кристал, вперше втілено такі функціональні операції як лінійне обернення хвильового фронту спінових хвиль, часова та частотна інверсія надвисокочастотних сигналів. На прикладі зворотної об'ємної магнетостатичної хвилі продемонстровано зворотний ефект Доплера в рухомому кристалі, утвореному поверхневою акустичною хвилею.

2.1.3. Дипольні магнетні кристали. Іншим типом магнетних кристалів є періодичні ґратки магнетних елементів – наноточок, наносмужок, та інших об'єктів, які називають «дипольними магнетними кристалами». У роботі представлені піонерські дослідження конфігураційної анізотропії мікрохвильового відгуку магнетного кристалу, яка відображає симетрію дипольної взаємодії між елементами кристалу. Вперше виявлено та пояснено появу двовісної анізотропії у квадратній ґратці циліндричних наноточок, а також запропоновано спосіб її підсилення шляхом обмінного зв'язку наноточок із магнетною підкладкою. Розроблено загальну теорію лінійних спин-хвильових збуджень у довільних масивах магнетних наноточок, в тому числі у складних періодичних ґратках. Вперше передбачено існування невзаємних спінових хвиль у дипольних магнетних кристалах, сформульовані умови невзаємності, визначені способи підсилення невзаємних властивостей магнетних кристалів, а також запропоновано спосіб створення магнетного кристалу з перебудовою властивостей від невзаємних до взаємних. Вперше запропоновано спосіб швидкої зміни статичної конфігурації дипольного магнетного кристалу на квазіперіодичний антиферомагнетний стан за допомогою імпульсів магнетного поля тривалістю кілька десятків наносекунд.

2.2. Логічні елементи та інші компоненти спин-хвильових цифрових інформаційних систем.

Спінні хвилі та їх кванти, магнони, привертають велику увагу також і з точки зору перспективи створення нової елементної бази обчислювальної техніки. Необхідно підкреслити, що, очевидно, магнетна логіка не може базуватись на підходах напівпровідникової логіки внаслідок хвильової природи носіїв інформації – магнетнів. Ця обставина, з одного боку, створює необхідність розробки нових принципів обробки цифрових сигналів, а з іншого – відкриває можливості розробки принципово нових, простіших чи ефективніших підходів до виконання тих чи інших логічних операцій. У цій роботі представлені розробки принципів функціонування різноманітних спин-хвильових логічних елементів, а також допоміжних елементів, необхідних для створення інтегрованих систем магнетної логіки.

2.2.1. Інтерференційні елементи магнетної логіки. Перші ідеї кодування цифрових даних у спин-хвильові сигнали та їх подальшої обробки базувались на амплітудному кодуванні (амплітудній модуляції) та на явищі інтерференції хвиль. Для побудови одних з перших логічних елементів, було запропоновано використання спин-хвильового інтерферометра Маха-Зендера, оснащеного керованими струмом фазообертачами, вбудованими в плечі інтерферометра. Дотримуючись цієї ідеї, авторами також було реалізовано принциповий

логічний елемент XNOR. Ці роботи, разом з ще декількома тогочасними фундаментальними працями інших авторів, фактично, започаткували новий напрям спін-хвильової електроніки – магنونну логіку. Згодом, авторами було вперше експериментально реалізовано ще один важливий інтерференційний елемент – мажоритарний логічний елемент, який є ключовим у реалізації іншого підходу до магنونної логіки – логіки з фазовим кодуванням даних.

2.2.2. Магنونний транзистор та логічні елементи на його основі. Подальший розвиток принципів магنونної логіки потребував пошуку способів керування спін-хвильовими сигналами за рахунок інших спін-хвильових сигналів, без необхідності додаткових перетворень цих сигналів в електричні та зворотно. Авторами було вперше продемонстровано, що таке керування можна здійснити за рахунок нелінійних процесів магنون-магنونного розсіювання в магنونному кристалі. Це явище лягло в основу розробки першого елемента повністю магنونної логіки (all-magnon logic) – магنونного транзистора. У ньому густина магنونного струму, що протікає від витоку до стоку, контролюється магнонами, інжекттованими в затвор транзистора. Експериментально вдалося реалізувати колосальну різницю магنونного струму транзистора у «відкритому» та «закритому» станах – 500 разів. Демонстрація першого магنونного транзистора стало принциповою віхою розвитку ідей магنونної логіки, адже підхід повністю магنونної логіки не лише дозволив радикально зменшити енерговитрати магنونних логічних елементів, але і відкрив принципову можливість досягнення наднизького енергоспоживання перспективних пристроїв магنونної логіки при подальшій мінітюаризації та оптимізації.

2.2.3. Нанорозмірний спрямований спін-хвильовий відгалужувач як універсальний елемент інтегрованих магنونних кіл. Найсучаснішим досягненням є розробка та експериментальна реалізація нанорозмірного спрямованого спін-хвильового відгалужувача. Відгалужувач побудований на основі двох нанорозмірних магنونних хвилеводів із залізо-ітрієвого гранату, пов'язаних між собою дипольною взаємодією. виготовлення нанорозмірних хвилеводів залізо-ітрієвого гранату саме по собі є нетривіальною задачею, і авторам вперше вдалося виготовити рекордно вузькі (шириною 50 нм) хвилеводи без суттєвого погіршення їх якості. Теоретично та експериментально показано, що спрямований відгалужувач є універсальним багатофункціональним пристроєм, який може виконувати роль планарного перехрещення хвилеводів, подільника потужності, частотного демультіплексора, а також нелінійного перемикача, керованого амплітудою вхідних сигналів. Остання властивість відкриває шлях для створення елементів повністю магنونної логіки на основі спрямованого відгалужувача, зокрема, показано, що він виконує логічні операції AND та XOR, і може бути центральним компонентом магنونного напівсуматора, який завдяки своїй простоті може елегантно замінити необхідні 14 транзисторів в сучасних напівпровідникових технологіях.

2.2.4. Допоміжні елементи магنونних логічних систем. Для коректної роботи логічних елементів необхідно забезпечення визначених співвідношень амплітуд чи/та фаз вхідних сигналів, які можуть спотворюватись у ході поширення сигналу. У роботі продемонстровані способи вирішення цих проблем. Вперше продемонстровано, що параметричний підсилювач біжучих спінових хвиль у нелінійному режимі працює як стабілізатор амплітуди хвилі. Вперше проаналізовано взаємодію спінових хвиль з неадіабатичною накачкою (просторовий спектр якої містить компоненти на подвоєному хвильовому числі хвилі), встановлено фазову чутливість такої взаємодії, яка, зокрема, дозволяє реалізувати корекцію фазових помилок спінових хвиль у системах магنونної логіки. Крім того, запропоновані способи ефективного

параметричного підсилення нелінійних спінових хвиль та інверсії фази хвилі за рахунок взаємодії з контрольованими дефектами.

2.2.5. Електрично керовані пристрої магنونіки. Запропоновано та обґрунтовано способи створення енергоефективних нанорозмірних пристроїв магنونіки за допомогою використання ефекту електрично керованої магнетної анізотропії у гетероструктурах феромагнетний метал - діелектрик. Вперше реалізовано збудження параметричного резонансу магнетної наноточки надвисокочастотним електричним полем. Запропоновані та досліджені способи збудження біжучих спінових хвиль, їх підсилення, амплітудно-фазового контролю за допомогою надвисокочастотного електричного поля. Необхідно відзначити, що із використанням запропонованих методів паразитні втрати (омічні, діелектричні, тощо) у пристроях стають сумірними і навіть меншими за втрати безпосередньо в магнетній підсистемі, що дозволяє створити магнетні пристрої з показниками енергоефективності, наближеними до теоретичних лімітів (одиниці аДж/біт)

2.3. Нелінійні та параметричні процеси в спін-хвильовій електроніці.

Нелінійні та параметричні процеси становлять невід'ємну частину магнетної динаміки, а, отже, і сучасної спін-хвильової електроніки, і є однією з головних переваг використання спінових хвиль для обробки цифрових та аналогових сигналів. Обернення хвильового фронту та часового профілю імпульсних надвисокочастотних сигналів, їх підсилення, збереження, когерентне відновлення, різноманітні операції з солітонами спінових хвиль та, нарешті, відкриття явища високотемпературної бозе-ейнштейнівської конденсації магнетнів складають неповний перелік досягнень даної роботи в цій області.

2.3.1. Підсилення та обернення хвильового фронту спінових хвиль. Вивчено взаємодію імпульсного електромагнетного випромінювання з пакетами спінових хвиль і вперше здійснено обернення хвильового фронту в трихвильовому параметричному процесі першого порядку, а також отримано інверсію форми надвисокочастотних імпульсних спін-хвильових сигналів. Вперше реалізовано неадіабатичну параметричну взаємодію біжучої хвилі з накачкою, зосередженою в області, меншій за довжину такої хвилі; продемонстровано зменшення порогу параметричного збудження спінових хвиль за рахунок неадіабатичності накачки майже у два рази. Здійснено підсилення та стиснення одновимірного спін-хвильового солітона нестационарною неадіабатичною параметричною накачкою та показано, що таке підсилення суттєво перевищує теоретичну межу, досягну для ідеального лінійного підсилювача – авторам вдалось реалізувати підсилення у 17 дБ, у той час як лінійний підсилювач дозволяє отримати лише 6 дБ без руйнування односолітонного режиму. Реалізовано параметричне обернення двовимірного хвильового фронту спінових хвиль та генерацію двовимірних солітонів – спін-хвильових булетів.

2.3.2. Обернення двомагнетної релаксації. Запропоновано та втілено на практиці новий спосіб обернення релаксації коливального руху – частотно-селективне підсилення вторинних збуджень просторово-неоднорідного середовища, утворених внаслідок двомагнетної релаксації сигнальної хвилі на неоднорідностях. Дієвість методу підтверджено когерентним відновленням надвисокочастотного сигналу за рахунок параметричного підсилення товщинних мод феритової плівки або ж мод магнетного кристала. Метод втілено з використанням як епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату, так і металевих магнетних плівок, більш сумісних з сучасними напівпровідниковими технологіями. Продемонстровано виконання спектрального аналізу надвисокочастотних сигналів оберненням релаксації їх спектральних компонент.

2.3.3. Високотемпературна бозе-ейнштейнівська конденсація магنونів. Вперше отримано бозе-ейнштейнівську конденсацію квантів спінових хвиль – магنونів, яка відбувається за кімнатної температури в параметрично збудженому магنونному газі в дотично намагнічених плівках залізо-ітрієвого гранату (це відкриття було відмічене в ряду 12 найвизначніших досягнень в галузі фізики 2006 року). Вивчено процеси параметричного заселення та термалізації магنونного газу, що ведуть до формування такого конденсату. Продемонстровано можливість випарного охолодження магنونного газу після вимкнення параметричної накачки. Прояснено взаємодію перенаселеного магنونного газу з фононним резервуаром та відкрито явище магنون-фононної акумуляції. Відкрито явище фазово-індукованих суперструмів в високотемпературному магنونному конденсаті.

2.4 Криволінійний магнетизм

Новітні нанотехнології дозволяють виготовляти складні тривимірні магнітні структури, у тому числі й криволінійні структури. У даній роботі розроблено мікромагнітну теорію криволінійного магнетизму в геометрично викривлених магнітних нанооб'єктах, яка встановлює нові геометрично-індуковані механізми появи анізотропії та хіральных взаємодій, а також передбачено низку ефектів топологічного структуроутворення та магнітохіральні ефекти, які зумовлені геометричними факторами.

2.4.1. Геометрично керовані магнітні взаємодії. Передбачено появу геометрично керованої анізотропії у магнітних дротах і плівках, що мають викривлену форму. Запропоновано новий геометричний механізм хіральної взаємодії Дзялошинського-Морії в ахіральних магнетиках. Введено концепцію мезоскопічної взаємодії Дзялошинського-Морії, інтенсивність і симетрія якої визначаються як матеріальними, так і геометричними параметрами, що відкриває можливості керування в широких діапазонах як величиною, так і напрямком мезоскопічної взаємодії за допомогою геометричних маніпуляцій. Розроблено теоретичний апарат для дослідження магнітних властивостей викривлених систем, знайдено аналітичні вирази для встановлених нових типів анізотропії і взаємодії Дзялошинського-Морії для нанодротів, нанострічок і нанооболонки.

2.4.2. Топологічне структуроутворення. Передбачено топологічне структуроутворення для широкої низки наноманетиків. Зокрема, в наночастинках типу осердя-оболонка передбачено існування різних типів магнітних вихрових станів, зумовлених геометричною кривиною, і побудовано теорію фазових переходів між ними. У стрічці Мебіуса передбачено існування різних типів топологічно захищених доменних стінок.

2.4.3. Геометричні магнітохіральні ефекти. Передбачено порушення магнітохіральної симетрії в магнітних вихорах, що утворюються в сферичних і циліндричних магнітних шапках. Запропоновано спосіб контрольованого перемикання хіральності магнітного вихору в напівсферичній шапці за допомогою магнітного поля, чого не можна досягти за допомогою однорідного поля в плоских вихрових наноточках. Передбачено явище піннінгу доменної стінки в викривлених нанодротах завдяки кривині. Передбачені явища спарювання геометричної хіральності системи і магнітохіральності текстури. Зокрема, встановлено вплив геометричної хіральності гвинтової лінії на орієнтацію основного стану і доменних стінок. Передбачено явище спарювання полярності вихору в сферичній нанооболонці з його хіральністю. Передбачено новий тип магнітних скірміонів, зумовлених кривиною. Запропонована концепція геометрично індукованого руху магнітних збуджень в нанодротах. На підставі цього передбачено рух доменної стінки у викривлених нанодротах з швидкостями до 100 м/с без уокерівських обмежень.

2.4.4. Криволінійна магنونіка. Передбачено явище локалізації магنونних мод у зігнутому нанодроті та розроблено теорії опису спінових хвиль у викривлених системах. Передбачено новий тип магنونних кристалів, індукованих кривиною, та запропоновано спосіб використання у приладах магنونіки, зокрема, у магنونних фільтрах.

2.5. Магнетні солітони у спінтроніці та магنونіці

Відзначена вище сильна нелінійність, притаманна магнетним матеріалам, призводить також і до формування різноманітних топологічних та нетопологічних статичних магнетних солітонів. Топологічні солітони привертають увагу, перш за все, завдяки «топологічній захищеності», яка сильно підвищує стійкість солітонів по відношенню до різноманітних флуктуаційних впливів. Оскільки топологічні характеристики – топологічний заряд, полярність, хіральність, тощо, можуть слугувати для кодування цифрової інформації, магнетні солітони активно розглядаються для створення запам'ятовуючих пристроїв. А принципово інша магнетна динаміка солітонів привертає до них увагу і з точки зору створення надвисокочастотних пристроїв спінтроніки та магنونіки. У даній роботі дослідження зосереджені, в першу чергу, на магнетних вихорах – найбільш простих, але, як наслідок, і найбільш цікавих для практики магнетних солітонів.

2.5.1. Мікрохвильові властивості та спін-хвильові моди магнетних елементів у вихровому стані. Проведені всеохоплюючі дослідження спін-хвильових збуджень магнетних наноточок у вихровому стані. Встановлено, що спін-хвильовий спектр тонкого (30 нм і нижче) циліндричного нанодиску у вихровому стані складається з однорідної гіротропної моди та дублетів азимутальних мод з різними радіальними індексами. За допомогою тримагنونного розпаду радіально симетричної моди вперше експериментально спостережені моди з великим азимутальним числом, так звані «магнетні моди шепітної галереї». Зі збільшенням товщини диску спін-хвильовий спектри стають складнішими та багатшими. По-перше, виявлено появу гіротропних мод вищих порядків, а також інверсію інтенсивностей основної та першої гіротропних мод – неочікуване і нетипове для коливальних систем явище. По-друге, виявлено появу нових мод, що мають закручену структуру на поверхнях і радіальні вузли в центральній площині диску, складна структура яких була пояснена зростаючим впливом неоднорідного поля, створеного ядром вихору.

2.5.2. Явища перемикавання в динаміці магнетних вихорів. Запропоновано спосіб перемикавання полярності вихору за допомогою змінного магнетного поля, яке рівномірно обертається в площині магнетика та побудовано теорію цього явища. Передбачено можливість появи різних режимів у динаміці полярності магнетного вихору – регулярної і хаотичної динаміки – під дією змінного осцилюючого магнетного поля та побудовано модель колективних змінних для опису явища. Запропоновано спосіб керування хіральністю вихору в нанодиску за допомогою імпульсу магнетного поля. Вперше передбачено явище перемикавання полярності вихору в феромагнетному нанодиску під впливом сталого поперечного спін-поляризованого струму. Зазначені явища згодом були спостережені експериментально; ці результати заклали підґрунтя для створення ефективних спінтронних пристроїв на основі магнетних вихорів.

2.5.3. Стабілізація магнетних солітонів у надтонких магнетом'яких плівках та наноточках для високоефективних спінтронних пристроїв. Запропоновано новітній підхід до стабілізації магнетних скірмайонів у магнетом'яких матеріалах за допомогою дипольного та обмінного зв'язку із магнетожорсткою матрицею антиточок, який відкриває шлях до вивчення та застосування магнетних скірмайонів у феромагнетних матеріалах з гарними резонансними властивостями (з низьким затуханням). Виявлено, що дипольна взаємодія з матрицею

античок дозволяє також інвертувати діаграму стабільності магнітних вихорів у магнітом'яких наноточках — стає можливою стабілізація магнітних вихорів в одночасно тонких та малих наноточках, що дозволяє суттєво підвищити резонансні частоти та ефективність вихрових спітронних пристроїв. Крім того, продемонстровано появу та можливість керування додатковим ступенем вільності – спіральністю вихорів та скірміонів — у таких системах.

2.6. Новітні матеріали та явища спітроніки

В останньому розділі роботи викладено ідеї авторів щодо принципів створення новітніх матеріалів спітроніки та з'ясування природи нових ефектів і явищ у них. Зусилля були спрямовані на досягнення високого ступеня спінової поляризації, керування процесами, що лежать в основі ефектів гігантського та колосального магнітоопору, розробку шляхів контрольованого впливу на ефективні магнітні параметри та дисипативні процеси. Показано, що окрім успіхів у вирішенні цих завдань, у роботі виявлено ряд новітніх фундаментальних та практично цікавих ефектів. Також представлено результати щодо розробки низки спітронних шаруватих наноструктур з розширеними функціональними можливостями.

2.6.1. Магнітні та магнітотранспортні властивості гранульованих плівок. Вперше експериментально виявлено дальній магнітний порядок у шаруватих наногранулярних плівках метал / діелектрик, так званий суперферромагнітний стан, обумовлений дипольними міжгранульними взаємодіями, та побудовано повну магнітну фазову діаграму таких систем в координатах густина гранул–температура. Встановлено кореляції між структурною, магнітною перколяцією та поведінкою тунельного магнітоопору в шаруватих гранулярних плівках. Розроблено теорію ферромагнітного резонансу в гранулярних плівках із врахуванням розміру гранул і температури.

2.6.2. Заміщені манганіти як перспективні матеріали спітроніки. Вперше з'ясовано особливості формування і взаємовпливу співіснуючих магнітних фаз у заміщених манганітах на основі LaMnO_3 — матеріалах з колосальним магнітоопором. Експериментально показано, що для даного класу матеріалів трансформація магнітного фазового складу спричинює суттєву зміну електричних і магніторезистивних характеристик. Розроблено піонерський підхід для аналізу двофазних систем «ферромагнітний метал / парамагнітний напівпровідник», і встановлено фундаментальні закономірності трансформації електричних та резонансних властивостей таких систем під дією зовнішніх впливів. Досліджено характер зміни магнітних і магніторезистивних властивостей плівок та гетероструктур на основі заміщених манганітів, під дією зовнішніх магнітного та електричного полів; отримані результати використано для створення керованих електричним полем гетероструктур «заміщений манганіт / заміщений титанат». Вперше експериментально зафіксовано і теоретично обґрунтовано, що перовскітні гетероструктури ферромагнетик / сегнетоелектрик можуть виявляти стимульований гігантський магнітокалоричний ефект – якісно новий ефект, який не характерний для окремих компонентів гетероструктури, а є результатом взаємодії деформаційних полів в області міжфазного інтерфейсу. Для конкретної комбінації перовскітних оксидів (манганіт лантану-кальцію / титанат барію) отримано, що величина ізотермічної зміни ентропії, нормованої на одиницю магнітної індукції, є порівнянною з рекордними величинами магнітокалоричного ефекту, досягнутими дотепер.

2.6.3. Магнітні та магнітодинамічні властивості сплавів Гейслера. Досліджено зв'язок між нанодвійниковою структурою та магнітними властивостями в сплавах Гейслера з ефектом пам'яті форми, які є цікавими з точки зору високого ступеня спінової поляризації та гарних

надвисокочастотних властивостей. Показано, що нанодвійникування може призводити до формування неколінеарної магнітної структури, якщо розміри двійників співрозмірні з довжиною обмінної кореляції. Розсіяння електронів на такій структурі обумовлює появу значного від'ємного магнітоопору в широкому діапазоні температур. Вперше продемонстровано формування самоорганізованої періодичної структури на поверхні епітаксійних плівок сплавів NiMnGa.

2.6.4. Спін-орбітальні ефекти та процеси динамічного обміну в гетероструктурах. Вперше експериментально реалізовано детектування параметрично збуджених спінових хвиль за допомогою комбінації явищ спінової накачки та оберненого спінового ефекту Холла, а також за допомогою планарного ефекту Холла. Ці методи показали ефективність для детектування також і коротких (обмінно-домінованих) хвиль, що важливо для розробки нанорозмірних пристроїв. Вперше експериментально досліджено і теоретично проаналізовано процеси, які визначають релаксацію магнітних моментів в обмінно-зв'язаній системі феромагнітних наночастинок, де зв'язок між шарами є температурно-залежним. Виявлено, що наявність міжшарового зв'язку може суттєво змінювати характер дисипативних процесів і приводити до збільшення або зменшення ефективного коефіцієнта дисипації системи. Вперше виявлено анізотропію динамічного обміну за рахунок спінових струмів у гетероструктурі антиферомагнетик / немагнітний метал / феромагнетик.

3. Висновки

У підсумку, у даній роботі представлено низку нових фундаментальних ефектів спінової динаміки магнітних структур, на основі яких, в тому числі, вказано шляхи та розроблено методи створення новітніх ефективних пристроїв спінтроники та спін-хвильової електроніки: комірок пам'яті, логічних елементів спін-хвильових цифрових систем, функціональних елементів аналогових систем обробки інформації та телекомунікації, закладено теоретичне та експериментальне підґрунтя для їх подальшого удосконалення. А саме:

- Створено новітні типи магнетонних кристалів, вивчено їх фізичні властивості, і продемонстровано широкий спектр задач електроніки надвисоких частот та техніки обробки інформації, які можуть бути вирішені з використанням магнетонних кристалів. Показано, що магнетонні кристали не лише дозволяють шляхом підбору геометрії керувати дисперсією та іншими властивостями спінових хвиль у незрівнянно більших межах порівняно із неструктурованими магнетиками, а й виявляють ряд унікальних властивостей, які дозволяють реалізувати складні операції обробки сигналів, створити динамічно керовані штучні середовища та середовища з перепрограмовними властивостями.
- Розвинуто принципи створення спін-хвильових логічних пристроїв та інших елементів систем спін-хвильової логіки. Розроблено та досліджено перший елемент повністю магнетонної логіки – магнетонний транзистор, а також нанорозмірний спін-хвильовий спрямований відгалужувач – технологічно простий елемент, який показав чудові перспективи для застосування в якості універсального елемента інтегрованих кіл магнетонної логіки. Запропонована концепція електрично керованих пристроїв магнетоніки, яка відкриває можливість не просто досягти конкурентоздатних показників систем магнетонної логіки, а й суттєво перевершити існуючі технології за показниками енергоефективності.
- Реалізовано низку складних функціональних операцій над спін-хвильовими сигналами за допомогою параметричної накачки: обернення хвильового фронту та часового профілю імпульсних надвисокочастотних сигналів, їх підсилення, збереження, когерентне

відновлення, різноманітні операції з солітонами огинаючої спінових хвиль, в тому числі рекордне підсилення та стиснення солітонів, що демонструє безумовні переваги спін-хвильової електроніки для побудови функціональних пристроїв аналогових систем обробки інформації. Відкрито явище високотемпературної бозе-ейнштейнівської конденсації магنونів під впливом параметричної накачки, що може бути використане для створення нового типу надвисокочастотних генераторів та в області квантових обчислень.

- Запропоновано нові геометричні механізми виникнення анізотропії та взаємодії Дзялошинського-Морії та введено концепцію мезоскопічної взаємодії Дзялошинського-Морії. Передбачено, що геометрична кривина магнітних наноструктур приводить до магнітохірального ефекту у ахіральних магнетиках, ефекту спарювання геометричної та магнітної хіральностей, нового типу магнітних скіріміонів, зумовлених кривиною, ґраткам скіріміонів, новому типу магнетонних кристалів. Розроблено теоретичні основи для опису таких ефектів. Продемонстровано способи використання досліджених ефектів для створення нових та покращення характеристик розроблених пристроїв магнетоники та спінтроніки.
- Вивчено динамічні властивості магнітних солітонів – магнітних вихорів. Встановлено характеристики спектру спін-хвильових збуджень магнітного вихору, який визначає реакцію вихору на зовнішній вплив. Запропоновано способи перемикання полярності та хіральності вихорів надвисокочастотним магнітним полем та спін-поляризованим струмом. Запропоновано спосіб суттєвого, у декілька разів, підвищення ефективності та швидкодії спінтронних пристроїв на основі магнітних вихорів.
- Створено та досліджено новітні матеріали для потреб спінтроніки та магнетоники, які демонструють такі унікальні та корисні властивості, як суперферромагнітний стан, гігантський магнітокалоричний ефект, ефект колосального магнітоопору, деформаційно-опосередкований магнітоелектричний ефект, утворення саморганізованих структур. Розроблено спінтронні гетероструктури для детектування коротких обмінних спінових хвиль та створення ефективних температурно-керованих пристроїв.

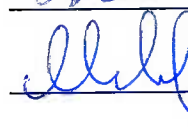
4. Публікації та цитування результатів роботи


Основні результати роботи колективу з восьми авторів опубліковані в 1-й монографії та 162 статтях. Згідно бази даних Web of Science загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 8462, h -індекс (за роботою) = 45; згідно бази даних Scopus: 8838 посилання, h -індекс = 44; згідно бази даних Google Scholar: 14467 посилань, h -індекс = 52. За результатами досліджень авторами та під їх керівництвом (консультуванням) захищено 9 докторських та 15 кандидатських дисертацій, також видано один навчальний посібник.


Р. В. Верба


В. О. Голуб



Г. М. Каказей


Г. А. Мелков


О. О. Серга


О. І. Товстоліткін


А. В. Чумак


Д. Д. Шека