

## РЕФЕРАТ

### роботи “Магنون-магنونні та магنون-фононні процеси в елементах магнітоелектроніки та магнітокалоріки”,

поданої на здобуття Премії Президента України для молодих вчених 2022 р.

Автори: *А. О. Косогор, Р. В. Верба, Д. В. Слободянюк*

#### 1. Вступ

Магнітовпорядковані матеріали та структури на їх основі показують величезне різноманіття унікальних фізичних ефектів та явищ, обумовлених взаємодіями між різними підсистемами матеріалу – магнітною, електронною, фононною, тощо, а також фундаментальними особливостями магнітної динаміки, у першу чергу, гіротропією руху магнітного моменту. Попри тривалі дослідження інтерес до магнітних матеріалів та структур не лише не стихає, а, навпаки, збільшується. Сучасні технології зробили можливим виготовлення магнітних мікро- та наноструктур, складних композитних матеріалів, властивості яких можуть принципово відрізнитись від доступних у недалекому минулому зразків. Фундаментальний інтерес до вивчення магнетиків та структур на їх основі підживлюється широкою областю їх застосування, від електроніки та обчислювальної техніки, силової електроніки, до біотехнологій, а розробка новітніх структур та матеріалів тільки розширює область потенційних застосувань у суспільній практиці.

Дана робота сконцентрована на дослідженні двох фундаментальних взаємодій у магнетиках та магнітних структурах – магنون-магنونній та магنون-фононній (магнітопружній) взаємодіях, які є домінантними у квазістатичних та надвисокочастотних процесах у магнетиках. Перша з них визначає нелінійну надвисокочастотну динаміку магнетиків, яка, як відомо, є однією з найвизначніших особливостей магнітовпорядкованих матеріалів, адже нелінійність магнітної динаміки проявляється за малих і помірних потужностей. Магنون-фононна взаємодія, яка зв'язує магнітну та пружну підсистему магнетика, є одним з головних джерел теплових шумів, що діють на магнітну підсистему (особливо у магнітних діелектриках), а також є визначальною у магнітоструктурних перетвореннях. Окрім того, обидві ці взаємодії відповідають за кінетику та процеси термалізації нерівноважних газів магنونів.

Окрім фундаментального інтересу багатомангонні та магنون-фононні процеси мають і велике прикладне значення. Як вже згадано, параметричні та багатомангонні процеси у магнетиках мають порівняно малі пороги, що дозволило створити велике різноманіття магнітних нелінійних пристроїв електроніки надвисоких частот, таких як обмежувачі потужності, фільтри слабких сигналів, помножувачі частоти, тощо. Нелінійні процеси є принципово важливими і для створення логічних елементів та систем обробки цифрових сигналів, що є предметом дослідження сучасного напрямку у фізиці магнітних структур – магنونіці. Магнітопружна взаємодія, в свою чергу, лежить в основі створення гібридних пристроїв магнітної та твердотільної акустичної електроніки, магнітних актуаторів, та багатьох інших. Окремо відзначимо сучасний напрямок магнітокалоріки, в основі якого лежать прямий та обернений магнітокалоричні ефекти, медійовані також магнітопружною

взаємодією, а інтерес пов'язаний із можливістю створення ефективних та компактних пристроїв охолодження, так званих магнітних холодильників.

Вищезгадані взаємодії та відповідні процеси грають надзвичайно важливу роль і в класичних об'ємних магнетиках, і є, здебільшого, добре вивченими у цьому випадку. У мікро- та наноструктурах роль подібних взаємодій та процесів може бути ще більш важливою як внаслідок малого об'єму і більшого відносного рівня теплових шумів, так і за рахунок суттєво більшого рівня збудження, досяжного у мікро- та наноструктурах. Більше того, як показано у роботі, багато з ефектів не мають аналогів в масивних магнетиках взагалі.

**Метою роботи** є вивчення магнон-магнонних та магнон-фононних процесів у магнітних наноструктурах та функціональних магнітних матеріалах, розробка теорій для їх опису та способів застосування для удосконалення існуючих та створення нових пристроїв магнітоелектроніки та магнітокалорики.

Робота охоплює три основні напрямки. Перший – це проблема особливостей та проявів багатомагноної взаємодії у мікро- та наноструктурах та пов'язана з цим проблема кінетика сильно нерівноважних магнонних систем (розділи 1, 2). Другий напрямок (розділи 3, 4) пов'язаний із впливом теплових шумів (тобто, взаємодії з тепловими магнонами та фононами) на мікрохвильову динаміку магнітних наноструктур. Нарешті, останній напрямок присвячено термодинаміці сучасних магнітопружних сплавів (розділи 5, 6). В цілому, авторами отримано низку фундаментальних теоретичних результатів, якими передбачено нові ефекти та пояснені сучасні експериментальні дані, а також запропоновані способи удосконалення розроблених та створення нових пристроїв магнітної електроніки надвисоких частот і функціональних магнітних матеріалів.

## **2. Зміст роботи та основні результати**

### **2.1. Нелінійні багатомагнонні процеси у мікро- та наносистемах**

Магнітовпорядковані матеріали виявляють велике різноманіття параметричних та нелінійних процесів. При малих та помірних рівнях збудження нелінійні процеси прийнято описувати як взаємодію декількох лінійних мод системи, тобто як багатохвильові чи, у випадку магнетиків, багатомагнонні процеси, серед яких найбільшу роль відіграють три- та чотиримагнонні процеси. У магнітних мікро- та наноструктурах картина багатомагнонних процесів може бути суттєво відмінною від добре вивчених процесів у масивних зразках. У першу чергу, це пов'язано із дискретністю спектру спінових хвиль у просторово обмежених зразках. Крім того, велика різноманітність можливих статичних магнітних конфігурацій феромагнітних мікро- та наноструктур призводить до якісних відмінностей багатомагнонних процесів у різних структурах. Авторами роботи було досліджено особливості багатомагнонних процесів у мікро- та наноструктурах та їх експериментальні прояви.

**2.1.1. Особливості багатомагноної взаємодії у системах з дискретним спектром та їх експериментальні прояви.** Основною особливістю багатомагнонних процесів у мікро- та наносистемах є їх нерезонансність, пов'язана із дискретністю спектру — лише за певних умов (значення зовнішнього поля, наприклад) умова резонансу багатомагнонного процесу може виконуватись точно. Авторами показано, що такі багатомагнонні процеси, а саме три- та

чотиримагнетонні процеси розпаду, мають чіткі якісні прояви на нелінійних резонансних кривих магнітних структур у вигляді характерних зламів чи/та дисторсії резонансної кривої. Оскільки виміри нелінійного феромагнітного резонансу є порівняно простими, ці ефекти дають простий та ефективний спосіб оцінки положення неоднорідних мод мікро- та наносистем, пряме збудження та детектування яких потребує складної техніки, а також ефективності нелінійної взаємодії цих мод з квазіоднорідними модами.

**2.1.2. Спонтанний та вимушений тримагнетонний розпад у вихрових магнітних наноточках.** Іншою важливою особливістю багатомангнетонних процесів у наносистемах є залежність їх ефективності та і самої можливості їх протікання від статичної магнітної конфігурації. У роботі це показано на прикладі найпростішого топологічно нетривіального стану – магнітного вихору. Теоретично та експериментально показано, що тримагнетонний процес завжди задовольняє закону збереження азимутального числа мод, а також не може бути частотно виродженим, що пов'язано з високою симетрією магнітного вихору. Використання тримагнетонного розпаду дозволило вперше спостерігати азимутальні моди вихрової наноточки з великими азимутальними індексами, які, як було виявлено, можуть бути класифіковані як «мангнетонні моди шепітної галереї». Також було реалізовано вимушений процес тримагнетонного розпаду шляхом додаткової стимуляції однієї з вторинних мод, що порушує тепловий розподіл неоднорідних мод у системі. Така додаткова стимуляція ще більш розширює можливості використання тримагнетонних процесів для дослідження спінових збуджень, адже може дозволити змінювати канал розпаду.

**2.1.3. Вплив тримагнетонних процесів злиття на спінову накачку.** Також у роботі продемонстровані та пояснені експериментальні прояви тримагнетонних процесів злиття. На відміну від процесів розпаду, процеси злиття мають спільні особливості у магнітних плівках та наноструктурах внаслідок фіксованості потенційного результуючого мангнетону у  $k$ - та  $\omega$ -просторах, тобто, процес злиття є резонансним тільки за певних умов. У дослідженнях двошарової спінтронної структури залізо-іттрієвий гранат - платина виявлено, що тримагнетонні процеси злиття проявляються у характерному провалі польової залежності спінової напруги Холла при параметричній накачці мангнетонів у систему, адже процеси злиття виступають в ролі додаткового каналу дисипації. За великої потужності накачки цей провал трансформується у пік внаслідок каскадних процесів розпаду результуючого мангнетону, що може бути використано для підвищення ефективності спінтронних перетворювачів спін-хвильових сигналів в електричні.

## **2.2. Кінетика нерівноважних мангнетонних газів**

Розглянуті у попередньому розділі нелінійності мангнетонної системи грають важливу роль у магнітній динаміці та кінетиці мангнетонних газів, зокрема далеко від точки термодинамічної рівноваги таких систем. Джерелом такої нерівно важності можуть бути різноманітні процеси, які, наприклад, змінюють загальну кількість мангнетонів у системі. Це може бути зовнішня електромагнітна накачка, спін-поляризований струм, спінові ефекти Холла та Зеєбека, тощо. Авторами роботи було вивчено нерівноважну динаміку мангнетонних газів у кількох експериментально цікавих та практично важливих випадках.

**2.2.1. Сильно нерівноважний стан мангнетонів у наноточці далеко за порогом нестійкості.** Ефективним методом збудження нелінійної динаміки системи є прикладання до неї

електромагнітної накачки – зовнішнього високочастотного магнітного поля. У роботі проаналізовано процес збудження дискретних мод магнітної наносистеми. Виявилось, що збудження є поетапним – при досягненні певних порогів протікання нерезонансних процесів поступово збуджуються все нові і нові моди системи. За великих рівнів накачки в системі можуть бути відбуватися процеси, аналогічні процесам кінетичної нестійкості в магнітних плівках, у результаті яких в системі відбувається збудження найнижчої за частотою моди незалежно від частоти накачки.

**2.2.2. Кінетика конденсації сильно нерівноважного газу магنونів.** Показано, що процеси кінетичної нестійкості можуть бути ефективним медіатором накопичення магنونів на найнижчому енергетичному рівні, тобто явища конденсації магنونного газу. У тому числі, ці процеси можуть ефективно сприяти та посилювати ефекти Бозе-Ейнштейнівської конденсації магنونів при створенні надлишкової популяції магنونів за допомогою електромагнітної накачки, зокрема зменшувати поріг конденсації.

**2.2.3. Вибухове випромінювання при релаксації багатомангонної системи.** Нелінійні три- та чотиримангонні процеси можуть грати роль навіть під час релаксації до стану термодинамічної рівноваги. За умови, що у системі є декілька вироджених по частоті мангонних груп, процеси розсіяння магنونів між ними можуть призводити до ефективної передачі енергії між ними, призводячи до автоколивального режиму згасань та вибухоподібного зростання амплітуди певних мангонних груп, що було показано експериментально та пояснено теоретично. Така поведінка не характерна для класичних коливних систем і є особливістю багатомодових систем з нелінійною взаємодією.

### **2.3. Теплові ефекти у динаміці спітронних наноосциляторів**

Теоретичне передбачення і експериментальне підтвердження ефекту спін-трансферу дозволило розробити і створити велике різноманіття пристроїв, серед яких чільне місце посідають магнітні наноосцилятори на основі ефекту спін-трансферу та споріднені з ними спінові осцилятори Холла, які є одними з найперспективніших пристроїв для створення мікро- та нанорозмірних джерел надвисокочастотних сигналів. У той же час, активне вивчення спітронних осциляторів швидко виявило принципові відмінності магнітної динаміки у них від раніше досліджуваних об'єктів, а також суттєві проблеми на шляху їх широкого впровадження у практику, зокрема, малу потужність генерації, сильний вплив шумів та недостатню когерентність генерації, тощо. Таким чином, постала проблема вивчення роботи спітронних осциляторів під впливом теплових шумів, дослідження фізичних явищ, до яких призводить взаємодія мод генерації з тепловим резервуаром спін-хвильових мод та фононів, та пошуку шляхів мінімізації негативних впливів флуктуацій на характеристики генерації, до вирішення якої долучились і автори даної роботи.

**2.3.1. Підвищення когерентності генерації спінових осциляторів Холла.** Вперше встановлено вирішальну роль дипольної взаємодії у стабілізації магнітних солітонів – спін-хвильових булетів – в квазіодновимірних спінових осциляторах Холла, що дозволяє реалізувати стійку монохроматичну генерацію в осциляторах з активною областю довжиною в одиниці мікрометрів і, таким чином, підвищити потужність генерації та її когерентність. Продемонстровано, що неоднорідний профіль густини спінового струму призводить до появи додаткової зворотної сили, що діє на спін-хвильовий булет, а також до просторового

рознесення булетів у режимі двомодової генерації. У підсумку, така неоднорідність густини струму накачки призводить до збільшення когерентності та стабільності режиму одномодової генерації осцилятора. Завдяки такому методу вдалось досягти рекордних значень ширини лінії генерації спінових осциляторів Холла в 1 МГц при частоті генерації 5.5 ГГц.

### ***2.3.2. Термічно-стимульований перехід від одно- до двомодового режиму генерації.***

Продемонстровано важливість врахування теплового шуму для опису складної динаміки магнітних наноосциляторів керованих спін-поляризованим струмом. За невеликого рівня теплових шумів поблизу порогу генерації основної моди з'являється невеликий пік вищої моди, а при подальшому зростанні струму вища мода подавлюється через конкуренцію за спільну накачку. За великого рівня шуму продемонстровано можливість переходу системи від одномодового до принципово двомодового режиму генерації в усій області струмів накачки над порогом.

## **2.4. Колективні процеси перемагнічування у ґратках магнітних наноточок**

Впорядковані ґратки магнітних наноточок є одним з типів магнетонних кристалів (штучних магнітних матеріалів з періодичною модуляцією магнітних параметрів), які привертають увагу завдяки практично необмеженим можливостям створення матеріалів із заданими особливостями дисперсії спінових хвиль, а, отже, і мікрохвильовими властивостями. Ґратки наноточок володіють ще однією цікавою властивістю — мультистабільністю — що відкриває можливості перебудови властивостей кристалу коротким імпульсом зовнішнього впливу. Розроблені методи перемагнічування ґратки є, однак, квазістатичними і, тому, малопридатними для застосувань. Альтернативний спосіб запропонований та досліджений у цій роботі.

### ***2.4.1. Метод швидкого перемагнічування ґраток магнітних наноточок у складні періодичні стани.***

Запропоновано спосіб створення швидкодіючих дипольних магнетонних кристалів з перебудовою властивостей. В основі запропонованого методу лежить перемагнічування ґратки у проміжний стан з перпендикулярною до основного стану наноточок намагніченістю і подальшою релаксацією системи у складний періодичний стан з майже нульовою намагніченістю. Порівняно із раніше розробленими методами, цей метод є більш ніж на три порядки швидшим і дозволяє перемагнічувати магнетонний кристал імпульсами магнітного поля з тривалістю порядку 50-100 нс. Показано, що кінцевий стан складається з кластерів з локальною антиферомагнітною періодичністю, розміри яких залежать від швидкості спадання поля імпульсу. З точки зору НВЧ властивостей достатньо утворення кластерів з 50 – 100 наноточок у кожному з них.

### ***2.4.2. Швидкість розвитку нестійкості колективної м'якої моди як визначальний фактор періодичності кінцевого стану масиву.***

Розроблена теорія перемагнічування ґраток дипольно зв'язаних магнітних точок під дією розмагнічуючого імпульсу поля з протяжним заднім фронтом. Показано, що основним процесом, який визначає статистику кінцевого стану, є розвиток нестійкості колективної м'якої моди. Чим повільніше зменшується поле в імпульсі, тим більше є часу для розвитку нестійкості в околі мінімуму спектру, і тим менша область спектру встигає стати нестійкою до моменту розвитку сильно нелінійної динаміки, коли багатомантонні процеси подавлюють можливість росту нових мод з теплового рівня. Встановлено, зокрема, що середній розмір кластерів  $A$  з ідеальною періодичністю зростає зі

збільшенням тривалості  $\tau$  заднього фронту імпульсу поля як  $A \sim \tau^{2/3}$ . Також встановлено, що зростання впорядкованості кінцевого стану зі збільшенням  $\tau$  обмежується іншим процесом, а саме переходом в тепловий режим перемагнічування, в якому суттєву роль починають грати термічно активовані стрибки намагніченості між локальними мінімумами енергії.

## **2.5. Термодинаміка та магнітокалоричні ефекти у функціональних магнетиках**

В останні роки багато уваги приділяється метамагнітним сплавам, з точки зору розробки нових матеріалів для магнітного охолодження, як однієї з перспективних альтернатив звичайної компресійної холодильної технології. У таких сплавах спостерігається як звичайний, так і обернений гігантський магнітокалоричний ефект, пов'язаний з магнітоструктурними фазовими перетвореннями першого роду. Завдяки обміну енергії між магнітною підсистемою (магнонами) та кристалічною граткою (фононами) сплави з магнітоструктурними фазовими перетвореннями демонструють цілу низку унікальних особливостей. На відміну від успішного теоретичного трактування магнітокалоричного ефекту при феромагнітних переходах другого роду, теоретичний опис оберненого магнітокалоричного ефекту є складним завданням, не розв'язаним раніше. Авторами роботи, на основі уявлень про природу магнітоструктурних перетворень та конкуренції між феро/антиферомагнітною взаємодією в метамагнітних сплавах, був розроблений термодинамічний підхід на основі теорії Ландау для забезпечення кількісного опису як оберненого, так і звичайного магнітокалоричних ефектів в метамагнітних сплавах.

**2.5.1. Теоретичне моделювання індукованої магнітним полем зміни ентропії в метамагнітних сплавах.** На основі теорії фазових переходів Ландау розроблена термодинамічна теорія, яка описує зміну намагніченості та індуковану магнітним полем зміну ентропії, що супроводжує фазовий перехід у метамагнітних сплавах. Зміна ентропії оцінюється при різних температурах і полях з виразу для вільної енергії, пов'язаної з процесами спінового обміну. Результати добре узгоджуються з розрахунками з перших принципів для сплаву Ni-Mn-In-Co та експериментальними даними для сплавів Ni-Mn-Sn. В розробленій теорії вільна енергія легко виражається за допомогою обмінних параметрів, тому зміна ентропії оцінюється як похідна по температурі від цієї енергії. Таким чином, теорія описує зміну ентропії у метамагнітних сплавах виходячи з фундаментальних термодинамічних співвідношень.

**2.5.2. Магнітний та немагнітний внески до теплоємності метамагнітного сплаву з ефектом пам'яті форми.** Показано, що розроблена кількісна теорія типу Ландау дозволяє вирішити складну наукову проблему розділення магнітних та немагнітних внесків до термодинамічних параметрів, що характеризують метамагнітні сплави зі складними магнітоструктурними фазовими перетвореннями, та, зокрема, розрахувати температурну залежність теплоємності метамагнітного сплаву. Продемонстровано, що форма піку теплоємності помітно залежить від об'ємної частки мартенситної фази, пов'язаної з кінетикою магнітоструктурного фазового переходу. Як приклад, було проаналізовано експериментальну температурну залежність теплоємності сплаву  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.4}\text{Sn}_{0.6}$  та окремо оцінено магнітний та немагнітний внесок у теплоємність цього сплаву, які виявились сумірними, і отже, жодним з них не можна нехтувати при розрахунку теплоємності метамагнітних сплавів.

### ***2.5.3. Прямий та обернений магнітокалоричний ефект в метаманітних сплавах.***

Розглянутий прямий та обернений магнітокалоричний ефект в залежності від величини прикладеного магнітного поля, а також від величини константи обміну. Показано, що підвищення значення магнітного поля приводить до посилення як прямого, так і зворотного ефекту, і вплив цього фактору на прямий магнітокалоричний дуже сильний. Слід відзначити, що різке збільшення теплоємності в діапазоні температур магнітоструктурного фазового перетворення є негативним з точки зору практики ефектом, оскільки це зменшує адіабатичну зміну температури. Показує, що ця невігідна особливість теплоємності зменшується у разі зменшення антиферромагнітного зв'язку між магнітними підґратками.

## **2.6. Вплив наночастинок на функціональні властивості мартенситних сплавів**

Сучасною тенденцією синтезування новітніх надпружних матеріалів на зразок магнітних та немагнітних сплавів є регулювання фізичних властивостей цих матеріалів шляхом введення до них спеціально створених наночастинок. Експериментально спостережена докорінна зміна фізичних властивостей мартенситних сплавів, спричинена введенням або утворенням наночастинок у його кристалічній ґратці, робить такі матеріали дуже привабливими для різноманітних технічних та медичних застосувань. Слід підкреслити, що неможливо з'ясувати роль наночастинок у трансформаційних, механічних та магнітних властивостях мартенситних сплавів без кількісного теоретичного аналізу локальних деформацій, зумовлених наноструктурами. У роботах авторів розвинений теоретичний підхід для кількісного моделювання впливу наночастинок на функціональні властивості мартенситних сплавів. Таким чином, контрольоване введення наночастинок відкриває можливості цілеспрямованого впливу на механічні, магнітні та магнітомеханічні властивості надпружних сплавів, для досягнення оптимального функціонування різноманітних приладів.

***2.6.1. Роль внутрішнього тиску у деформаційних властивостях сплавів.*** Для опису впливу наночастинок на властивості мартенситних сплавів була розроблена спеціальна версія феноменологічної теорії фазових переходів Ландау. Внутрішній тиск, який може виникати при появі наночастинок, кристалічних дефектів або зміни хімічного впорядкування, перенормовує коефіцієнти у розкладі для потенціалу Гіббса. Це призводить до різких змін напружено-деформаційних петель, отриманих для сплаву з наночастинками. Зокрема, внутрішній тиск, зумовлений наночастинками, може привести до розширення температурного інтервалу спостереження надпружності, а також до розширення гістерезису мартенситного перетворення та збільшення величини критичного напруження, яке запускає фазове перетворення.

***2.6.2. Вплив внутрішніх напружень, зумовлених наночастинками, на деформаційні властивості сплавів.*** Розглянуті внутрішні пружні деформації, які виникають в кристалічній ґратці сплаву за наявності наночастинок, і ці деформації були введені в вираз для потенціалу Гіббса сплаву з наночастинками. Таким чином, були побудовані теоретичні петлі напруження-деформація і показано, що навіть невеликі внутрішні деформації можуть приводити до значних відмінностей у кривих надпружності для сплаву з наночастинками та сплаву без наночастинок. Показано, що внутрішні деформації можуть збільшити величину надпружної деформації та зміцнити кристалічну ґратку сплаву. Теоретичні результати порівняні з експериментальними даними, отриманими для сплавів Co-Ni-Ga, та продемонстроване добре узгодження між теоретичними та експериментальними результатами. Показано, що чим більша зміна об'єму

відбувається під час мартенситного перетворення, тим більш вираженим є вплив наночастинок на надпружну поведінку мартенситного сплаву.

### 3. Висновки

У підсумку, у даній роботі представлено низку фундаментальних досліджень магнон-магнонних та магнон-фононних (магнітопружних) процесів у сучасних магнітних наноструктурах та функціональних магнітних матеріалах. А саме:

- Вивчено особливості багатомagnoнних процесів у магнітних мікро- та наноструктурах, такі як нерезонансність та поява специфічних правил відбору. Продемонстровано ефекти таких процесів на нелінійний феромагнітний резонанс у мікро- та наноструктур, які дозволяють отримати інформацію про сильно неоднорідні моди структур з порівняно простих експериментів. Показано вплив тримагнонних процесів злиття на спінову накачку у двошарових структурах феромагнетик – важкий метал та можливість підсилення спінової накачки за рахунок багатомagnoнних процесів.
- Вперше продемонстровано можливість протікання в магнітних наносистемах процесів, аналогічних процесам кінетичної нестійкості в магнітних плівках, зокрема, збудження найнижчої моди системи при великому рівні накачки. Показано, що такі процеси можуть бути ефективним медіатором процесів конденсації, зокрема, зменшуючи поріг появи конденсату.
- Запропоновано та досліджено способи підвищення потужності та когерентності генерації спінових осциляторів Холла. Перехід до квазіодновимірної активної зони осцилятора (наносмужка) дозволяє стабілізувати збуджений динамічний дисипативний солітон – булет – у значно більшій активній області, розмірами у кілька мікрометрів, і, таким чином підвищити потужність генерації, а створення неоднорідного профілю струму накачки призводить до більшої когерентності генерації за рахунок зменшення флуктуацій позиції булету. У спітронних осциляторах, у яких збуджуються квазілінійні моди, показано можливість переходу від одномодової до двомодової генерації під впливом сильного теплового шуму.
- Запропоновано спосіб створення швидкодіючих магнонних кристалів на основі ґраток наноточок з перебудовою властивостей. Метод дозволяє перемикати масив у квазірегулярний складний періодичний стан (наприклад, шаховий антиферомагнітний) за допомогою коротких імпульсів магнітного поля тривалістю 50-100 нс, що на три порядки швидше за раніше розроблені аналоги. Показано, що фізичними процесами, які визначають властивості кінцевого стану, є процес росту нестійкості колективної м'якої моди ґратки та нелінійне обмеження росту нестійкості. Регулярність кінцевого стану масиву (розмір кластерів з ідеальною періодичністю) зростає зі зменшенням швидкості спадання поля на задньому фронті імпульсу.
- Побудована теорія для опису прямого та оберненого магнітокалоричного ефекту у метамагнітних сплавах, яка ґрунтується на фундаментальному термодинамічному взаємозв'язку між вільною енергією магнітного обміну матеріалу та функцією ентропії. Теорія описує якісні та кількісні особливості: а) зміни ентропії в ході мартенситного перетворення сплаву; б) звичайного магнітокалоричного ефекту, найбільш вираженого



поблизу температури Кюрі та температури мартенситного перетворення, яке відбувається в феромагнітному стані сплаву; в) звичайного та оберненого магнітокалоричного ефекту, спостереженого, відповідно, поблизу температури Кюрі та в температурному інтервалі магнітоструктурного фазового перетворення метамагнітного сплаву; г) температурної залежності теплоємності метамагнітного сплаву.

- Розроблена спеціальна версія феноменологічної теорії фазових переходів Ландау для опису впливу наночастинок на властивості мартенситних сплавів. Показано, що внутрішні деформації, зумовлені наночастинками, можуть збільшити значення надпружної деформації, зміцнити кристалічну ґратку сплаву та розширити температурний інтервал спостереження надпружності. Показано, що мартенситні сплави, які демонструють помітну зміну об'єму під час мартенситного перетворення, є перспективними матеріалами для контрольованого введення наночастинок з метою досягнення оптимального функціонування.

Отримані фундаментальні результати відкривають шлях до удосконалення існуючих та створення нових пристроїв магнітної електроніки, функціональних матеріалів магнітокалорики та НВЧ електроніки.

#### 4. Публікації та цитування результатів роботи

Основні результати роботи колективу з трьох авторів опубліковані в 23 статтях (усі - в англійських журналах з імпаکت-фактором). Згідно бази даних Web of Science загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 205,  $h$ -індекс (за роботою) = 7; згідно бази даних Scopus: 233 посилання,  $h$ -індекс = 9; згідно бази даних Google Scholar: 293 посилання,  $h$ -індекс = 10. Результати досліджень увійшли до двох докторських та двох кандидатських дисертацій авторів роботи.

  
\_\_\_\_\_ Анна КОСОГОР  
  
\_\_\_\_\_ Роман ВЕРБА  
  
\_\_\_\_\_ Денис СЛОБОДЯНЮК