На здобуття

Премії Президента України для молодих вчених 2022 року

МАГНОН-МАГНОННІ ТА МАГНОН-ФОНОННІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕМЕНТАХ МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКИ ТА МАГНІТОКАЛОРИКИ

Робота представлена

Інститутом магнетизму НАН України та МОН України

АВТОРИ

КОСОГОР
Анна Олексіївна

доктор фіз.-мат. наук,
старший дослідник,
в.о. завідувача лабораторії,
Інститут магнетизму

ВЕРБА
Роман Володимирович

доктор фіз.-мат. наук,
завідувач відділу,
Інститут магнетизму*

СЛОБОДЯНЮК
Денис Володимирович

кандидат фіз.-мат. наук,
старший науковий
співробітник,
Інститут магнетизму*

*Частина досліджень виконана у період роботи / аспірантури у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка

ОПИС РОБОТИ

Кількість публікацій: 23 статті, в т.ч. 15 статей у виданнях, що належать до квартилів Q1, Q2

Кількість цитувань: 205 (Web of Science) / 233 (Scopus) / 293 (Google Scholar)

h-індекс (за роботою): 7 (Web of Science) / 9 (Scopus) / 10 (Google Scholar)

Мета роботи – 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

СТРУКТУРА РОБОТИ

Багатомагнонні процеси та їх роль у магнітній динаміці

1. Багатомагнонні процеси у магнітних мікро- та наноструктурах – медіатор кінетики магнонних газів
2. Кінетика сильно нерівноважних магнонних газів

Теплові шуми у динаміці магнітних структур

3. Теплові ефекти у динаміці спінтронних наноосциляторів
4. Колективні процеси перемагнічування впорядкованих масивів магнітних наноточок

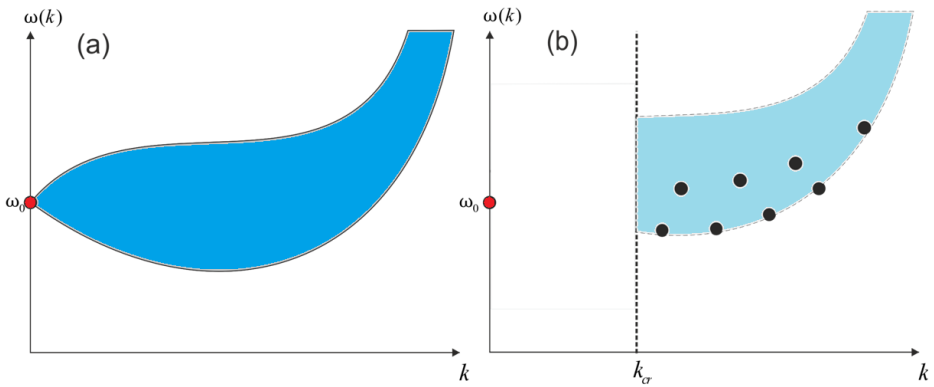
Магнітопружна взаємодія та термодинамічний опис метамагнітних сплавів

5. Термодинаміка та магнітокалоричні ефекти у функціональних магнітних сплавах
6. Вплив наночастинок на властивості мартенситних сплавів

БАГАТОМАГНОННІ ПРОЦЕСИ У НАНОСТРУКТУРАХ

Головна особливість магнітних мікро- та наноструктур – ***дискретний спектр***.

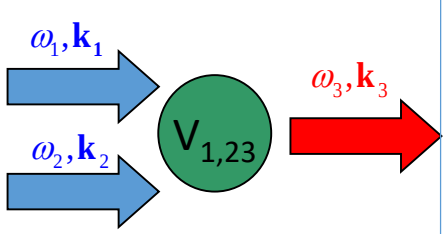
спектр у плівці *у наноструктурі*



Наслідок – резонансні умови багатомагнонних процесів виконуються лише за певних умов (значення поля, наприклад), здебільшого процеси стають ***нерезонансними***.

Найважливіші процеси:

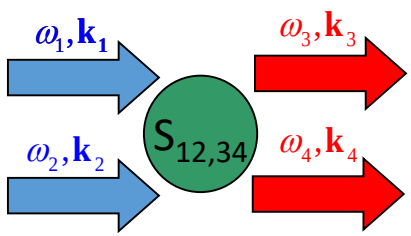
тримагнонні



$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$$

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3$$

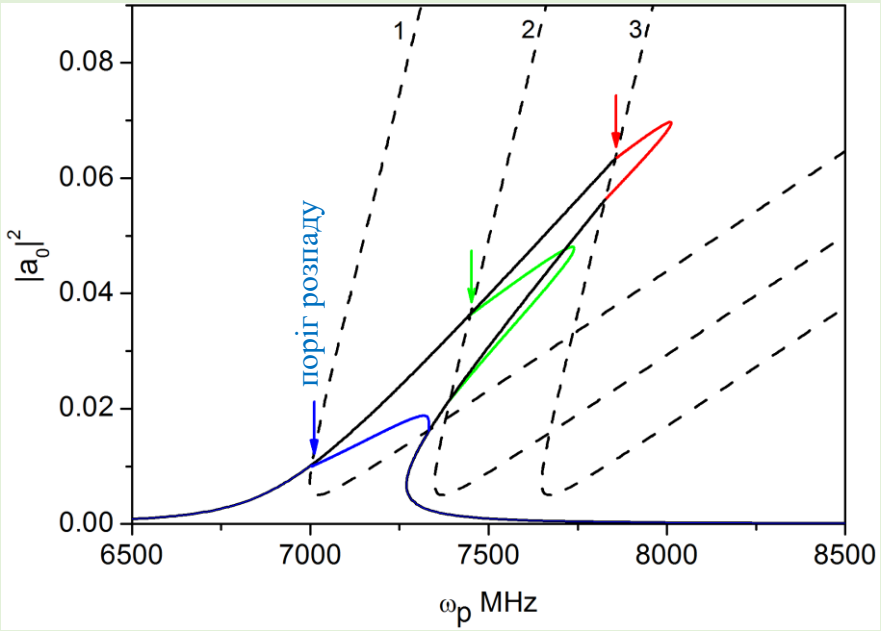
чотиримаонні



$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$$

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4$$

Дисторсія кривих нелінійного феромагнітного резонансу



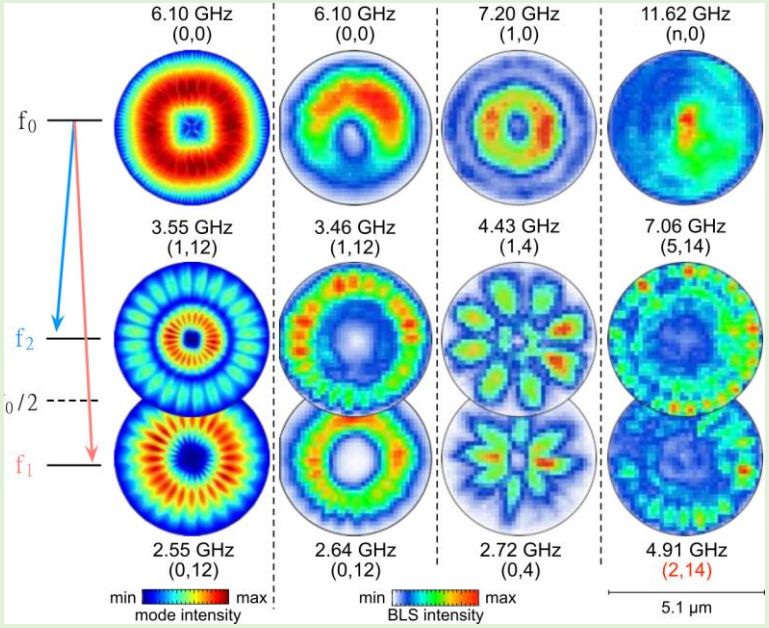
Показано, що 3- та 4-магнонні процеси розпаду мають чіткі якісні прояви на нелінійних резонансних кривих мікро- та наноструктур, у вигляді характерних зламів чи/ та дисторсії. Це може бути використано для ***експериментально простої оцінки*** положення суттєво неоднорідних мод системи, які вкрай складно збудити та безпосередньо детектувати.

IEEE Magn. Lett. **4**, 4000504 (2013); **10**, 6103405 (2019).

БАГАТОМАГНОННІ ПРОЦЕСИ У НАНОСТРУКТУРАХ

Друга особливість багатомагнонних процесів у мікро- та наноструктур – ***правила відбору***, ***специфічні*** для конкретної геометрії та магнітної конфігурації.

Тримагнонний розпад у вихрових наноточках та «моди шепітної галереї»



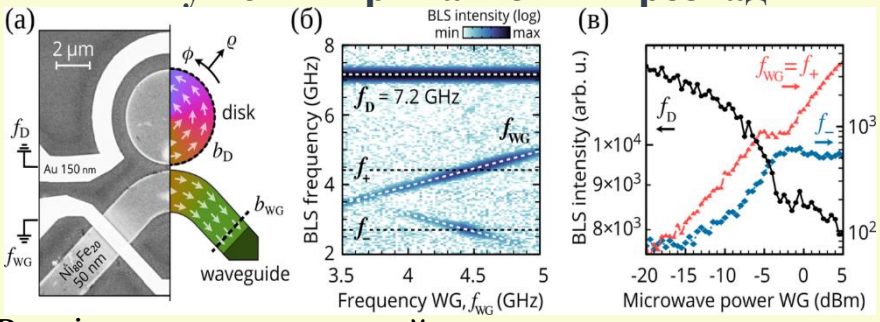
Вперше реалізовано нелінійне тримагнонноне розсіювання у магнітних дисках у вихровому стані. Завдяки цьому вперше спостережені ***вищі азимутальні моди***, які за великих азимутальних чисел моди набувають характеру ***мод «шепітної галереї»***. Phys. Rev. Lett. **122**, 097202 (2019).

Теорія тримагнонної взаємодії у вихорі

Теоретично показано, що тримагнонний процес у вихорі завжди задовольняє ***закону збереження азимутального числа мод***, а також ***не може бути частотно виродженим***, що пов'язано з високою симетрією магнітного вихору. При розпаді радіально симетричної моди вторинні моди відрізняються радіальним числом, що і спостерігалось в експерименті.

Phys. Rev. B **103**, 014413 (2021).

Вимушений тримагнонний розпад

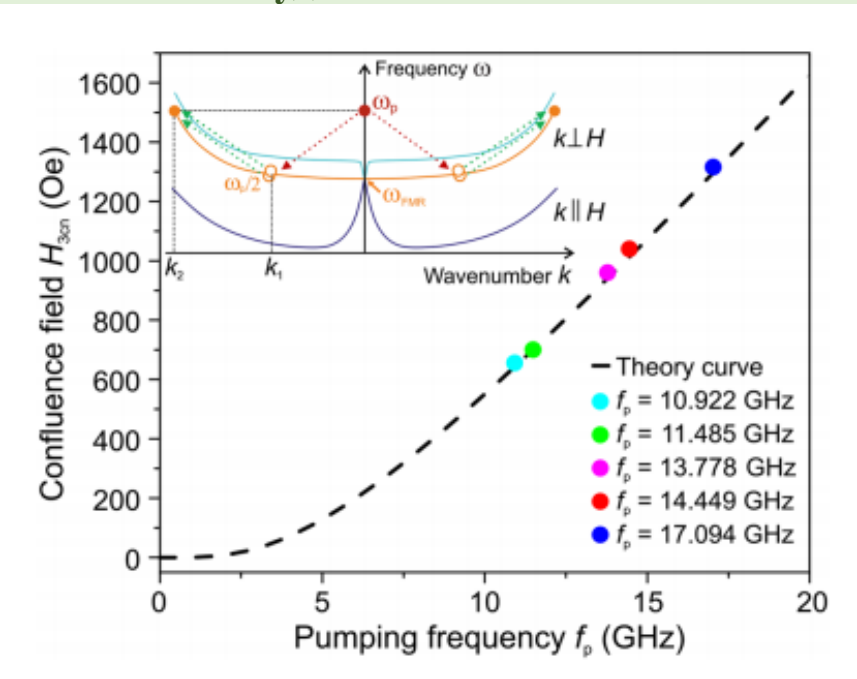


Реалізовано вимушений процес тримагнонного розпаду шляхом додаткової стимуляції однієї з вторинних мод, що порушує тепловий розподіл неоднорідних мод у системі. Це ще більш розширює можливості використання тримагнонних процесів для дослідження спінових збуджень, адже може дозволити змінювати канал розпаду. Phys. Rev. Lett. **125**, 207203 (2020).

БАГАТОМАГНОННІ ПРОЦЕСИ У НАНОСТРУКТУРАХ

Іншим важливим типом тримагнонних процесів є процес злиття. На відміну від процесів розпаду, процеси злиття мають спільні особливості у магнітних плівках та наноструктурах внаслідок фіксованості потенційного результуючого магнону у k- та ω-просторах

Тримагнонне злиття параметрично збуджених магнонів

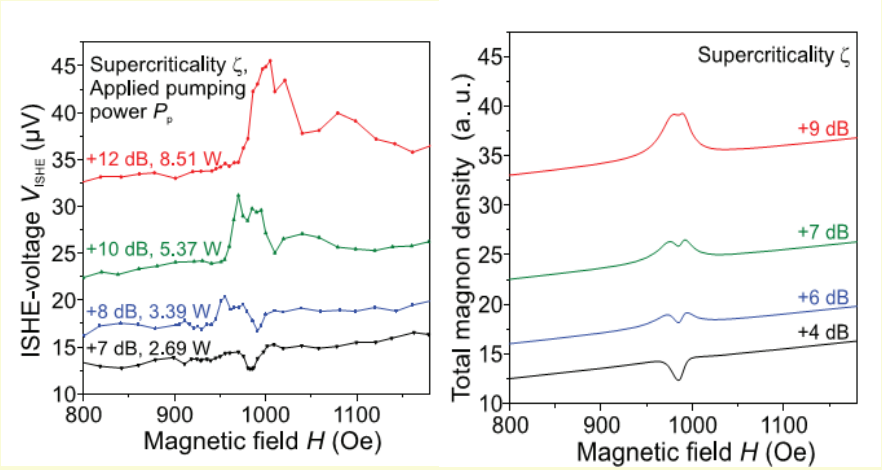


Процеси злиття є резонансними тільки при певному значенні зовнішнього магнітного поля.

Порівняння з експериментом

В експерименті загальна кількість магнонів фіксується завдяки оберненому ефекту Холла, який дозволяє реєструвати магнони незалежно від їх хвильового числа.

експеримент *теорія*



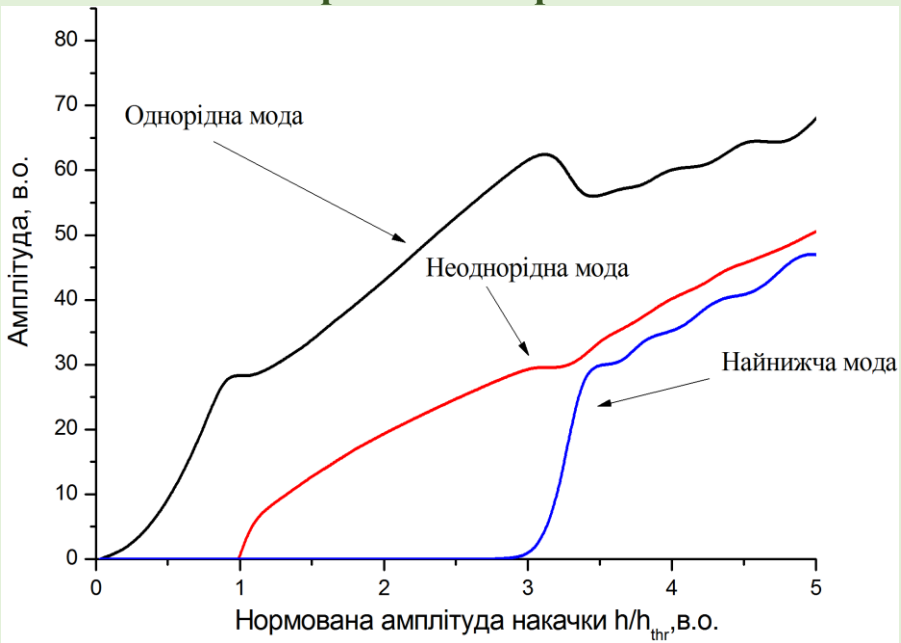
Виявлено, що ***тримагнонні процеси злиття*** проявляються у ***характерному провалі польової залежності*** спінової ***напруги Холла*** при параметричній накачці, який, за великої потужності накачки трансформується у пік внаслідок каскадних процесів розпаду результуючого магнону.

Phys. Status Solidi (b), **256**, 1900121 (2019).

КІНЕТИКА НЕРІВНОВАЖНИХ МАГНОННИХ ГАЗІВ

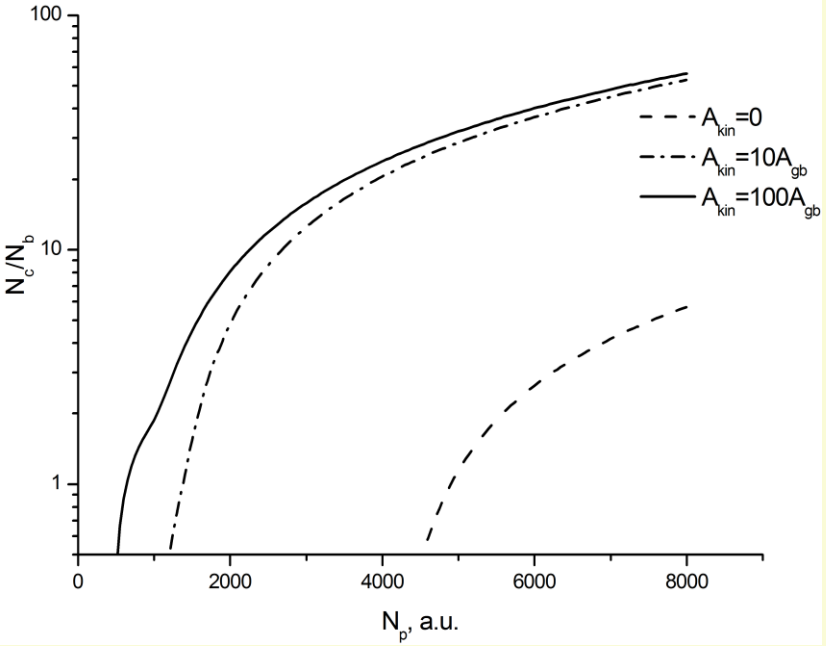
Генерація додаткових магнонів у системі виводить її зі стану термодинамічної рівноваги. На перших етапах релаксація системи відбувається за рахунок багатомагнонних процесів розсіяння.

Сильно нерівноважний стан в магнітних наноточках при високих рівнях накачки



Вперше показано, що в магнітних наноточках за високих рівнів накачки можуть мати місце процеси, аналогічні процесам ***кінетичної нестійкості*** в плівках. Зокрема, ***передача енергії у найнижчу моду системи***, яка не пов'язана жодним резонансним процесом зі збудженою (однорідною) та параметричною (неоднорідною) модами. Укр. фіз. ж. **58**, 189 (2013).

Кінетика магнонного газу, яка веде до конденсації

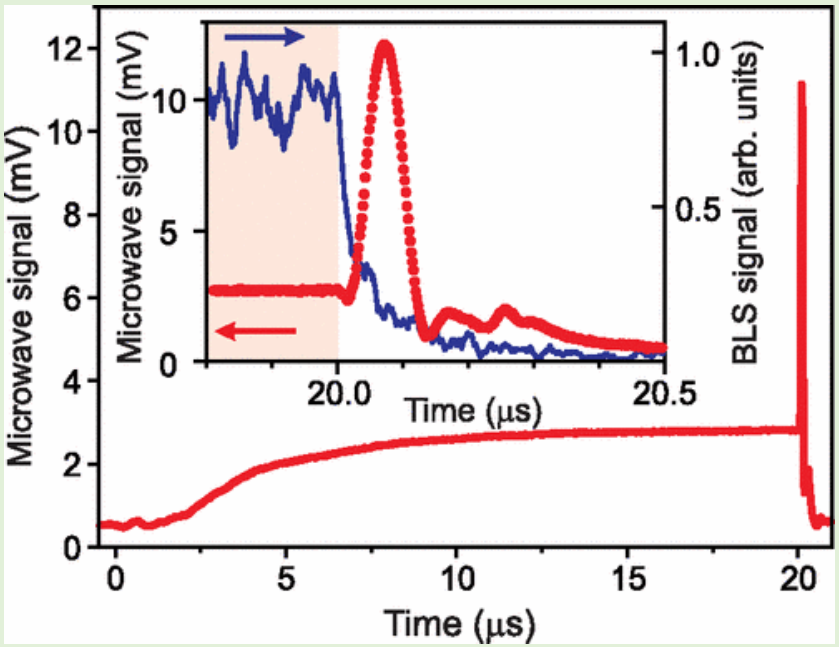


Вперше продемонстровано, що ***ангармонізми*** збудженої магнонної системи можуть бути ***ефективним медіатором процесів конденсації магнонів*** – накопичення магнонів на найнижчому енергетичному рівні. Зокрема, такими процесами можуть бути процеси кінетичної нестійкості у газі магнонів. J. Nano. Electron. Phys. **9**, 03033 (2017).

КІНЕТИКА НЕРІВНОВАЖНИХ МАГНОННИХ ГАЗІВ

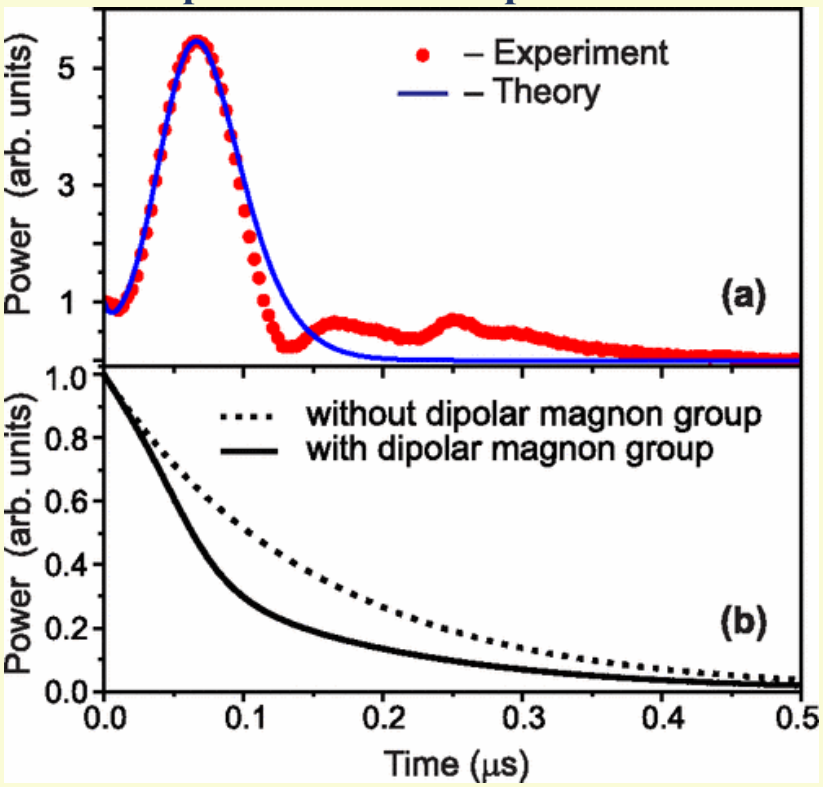
Нелінійні взаємодії у збудженому магнонному газі можуть грати важливу роль у динаміці системи навіть після закінчення дії накачки, зокрема при релаксації системи.

Вибухове випромінювання з плівки



Спостережено ***вибухоподібне випромінювання*** з плівки залізо-іттрієвого гранату ***після закінчення імпульсу накачки***. Іншою характерною особливістю є ***автоколивальний режим згасання сигналу***.

Порівняння з експериментом

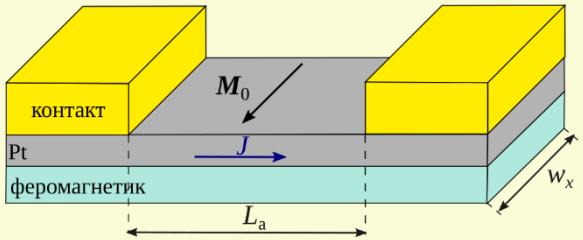


За допомогою розробленої теорії показано, що причиною спостережених явищ є ***багатомагнонні процеси***, які призводять до передачі енергії від короткохвильових параметрично збуджених магнонів до довгохвильових дипольних магнонів, останні з яких сильно зв'язані з електромагнітною модою. Phys. Rev. Lett. **111**, 187206 (2013).

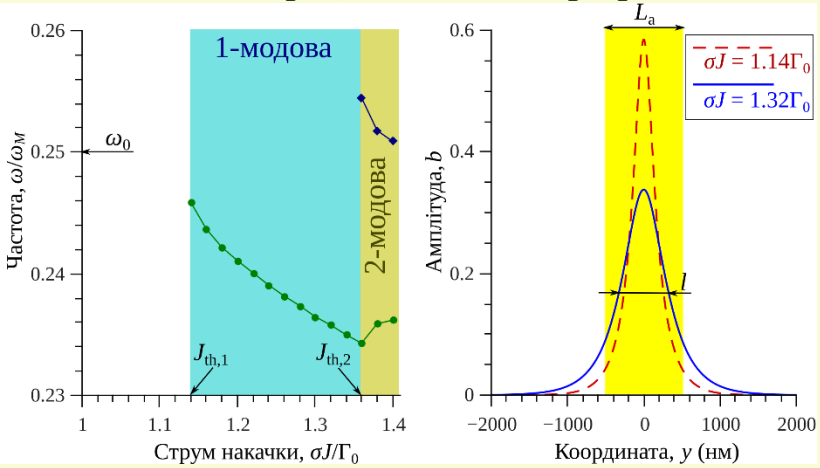
ТЕПЛОВІ ШУМИ У СПІНТРОННИХ ОСЦИЛЯТОРАХ

Спінові осцилятори Холла, СОХ - автоосцилятори, що працюють на основі ефекту спін-трансферу та спінового ефекту Холла – перспективні джерела НВЧ з перебудовою частоти для мікроелектроніки. Проблеми: у 2D структурах стійка генерація тільки у малих СОХ → мала потужність → мала когерентність. Природа (тип) збудження у 1D СОХ була невідома

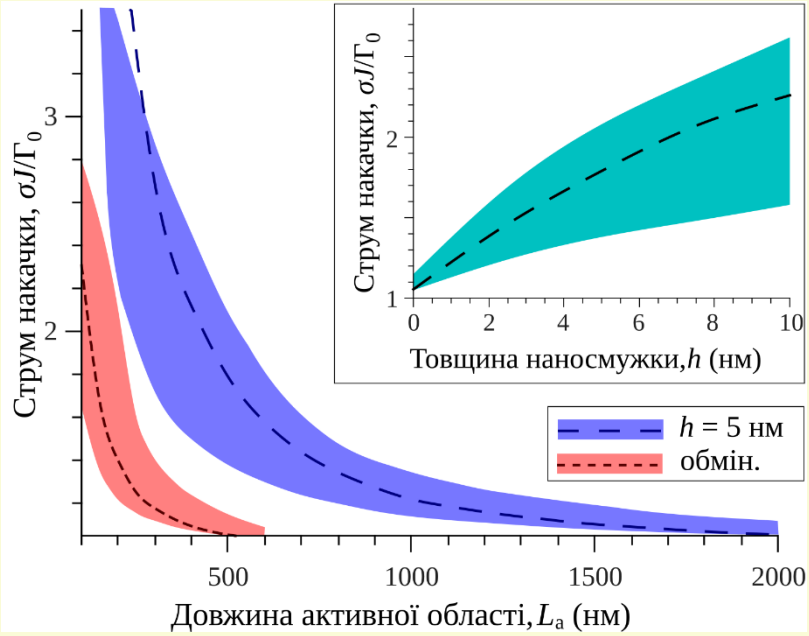
Збудження квазі-1D СОХ



частота генерації *профіль моди*



Область одномодової генерації

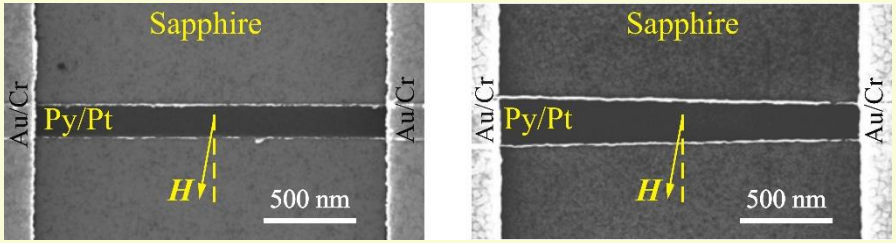


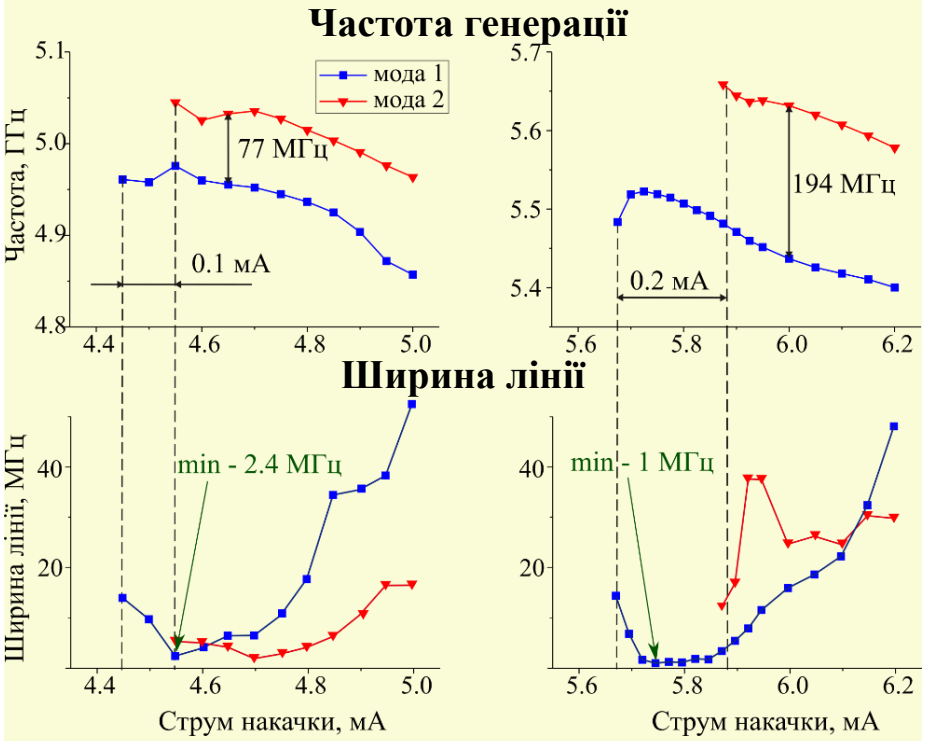
Вперше встановлено вирішальну роль ***дипольної взаємодії*** у стабілізації магнітних солітонів (булетів) у квазі-1D СОХ, що дозволяє реалізувати ***стійку одномодову генерацію*** в СОХ з активною областю довжиною в одиниці мікрометрів і, отже, ***підвищити потужність та когерентність***. На відміну від відомих обмінних булетів, ***дипольні булети*** – новий клас ***дисипативних солітонів***, які не спостерігались у раніше досліджуваних системах.

ФНТ **46**, 920 (2020).

Квазі-1D СОХ на основі наносмужок змінного перерізу

Рівна наносмужка *Змінного перерізу*

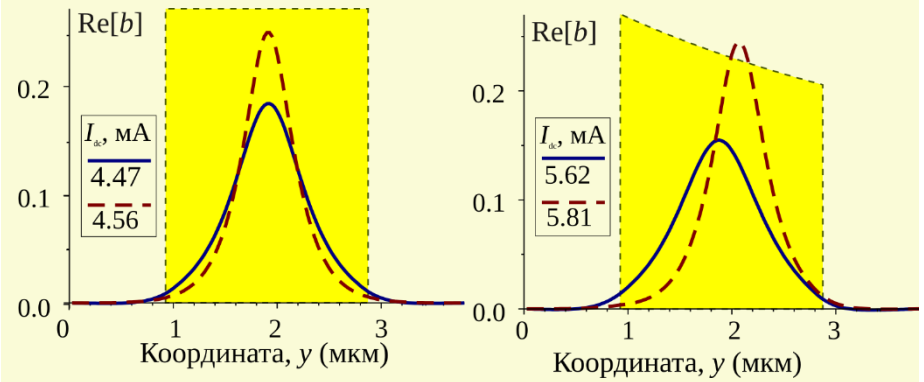




Динаміка СОХ за неоднорідного профілю накачки

Профілі збуджень (моделювання)

Рівна наносмужка *Змінного перерізу*

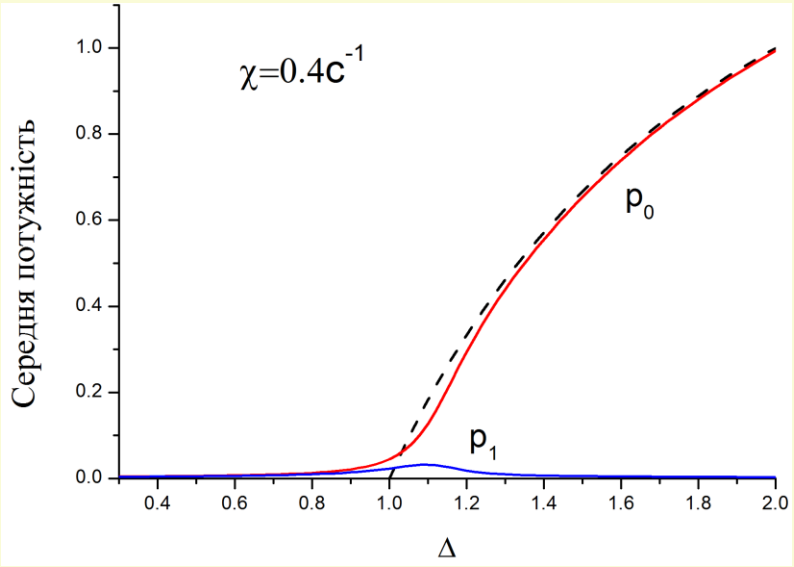


Продемонстровано, що неоднорідний профіль густини спінового струму призводить до ***появи додаткової зворотної сили***, що діє на спін-хвильовий булет, а також до просторового рознесення булетів у режимі двомодової генерації. У підсумку, така неоднорідність густини струму накачки призводить до ***збільшення 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. Sci. Rep. **5**, 16942 (2015).

ТЕПЛОВІ ШУМИ У СПІНТРОННИХ ОСЦИЛЯТОРАХ

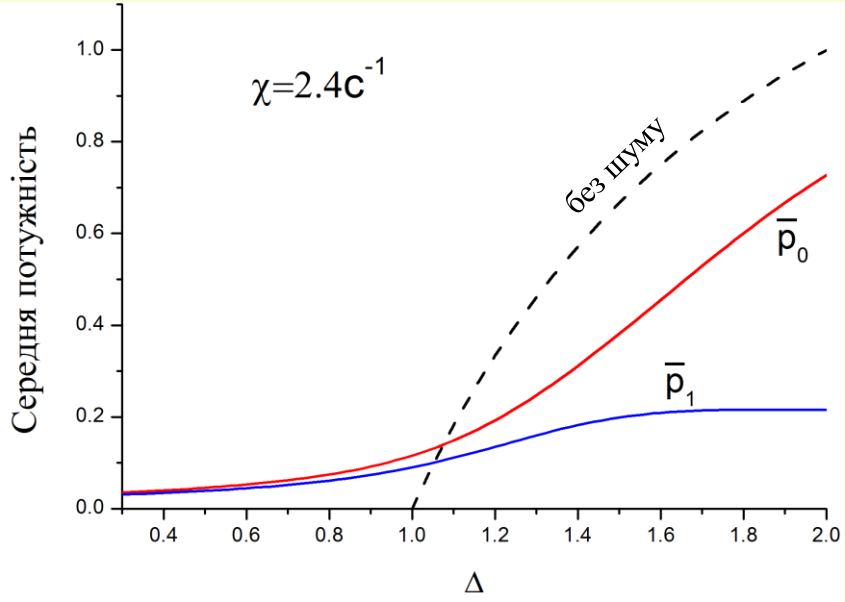
Спінтронний наноосцилятор є сильно нелінійною системою, загалом, багатомодовою, у якій різні моди пов'язані багатомагнонною взаємодією та конкуренцією за накачку. Малі геометричні розміри призводять до помітного впливу теплових шумів. У літературі, однак, вплив теплового шуму проаналізований тільки для одномодової системи.

Динаміка за малого рівня теплових шумів (ефективно одномодовий режим)



Невеликий пік вищої моди (p_1) біля порогу, далі мода подавлюється через конкуренцію за накачку

Динаміка за високих значень теплових шумів (двомодовий режим)



Високий рівень шуму не дає основній моді подавити вищу моду. Потужність ділиться між двома модами.

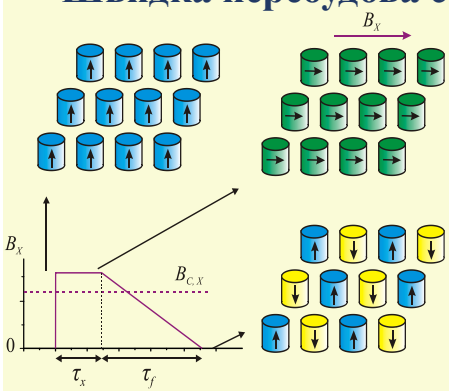
Продемонстровано важливість врахування теплового шуму для опису складної динаміки магнітних наноосциляторів керованих спін-поляризованим струмом. Вперше продемонстровано можливість ***переходу системи від одно до двомодового режиму генерації під дією теплового шуму в системі.***

Cond. Matter Phys., **17**(1), 13801 (2014).

КОЛЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ГРАТОК МАГНІТНИХ НАНОТОЧОК

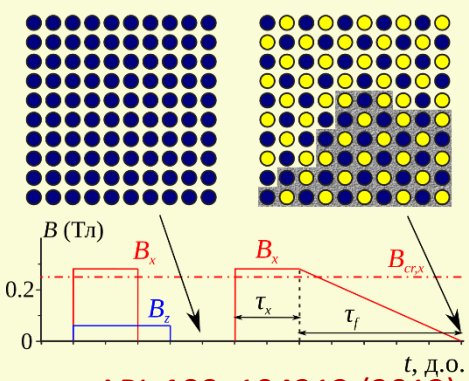
Впорядковані ґратки магнітних наноточок розглядаються як перспективні штучні матеріали техніки НВЧ та спін-хвильової електроніки. Важлива властивість – ***мультистабільність*** → шлях до динамічного керування. Проблема – повільність раніше розроблених методів зміни стану масиву (t ~ 1 мс.)

Швидка перебудова стану ґратки наноточок



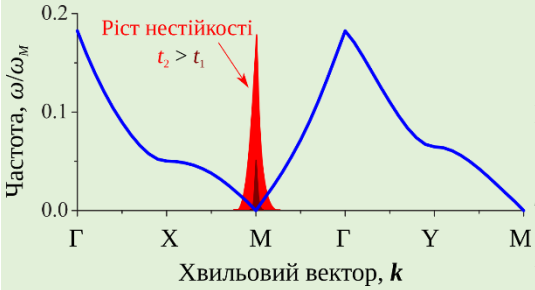
Запропонований новий метод – перемагнічування у проміжний стан, з якого система релаксує складний періодичний стан з майже нульовою намагніченістю. Час процесу – ***50-100 нс***.

Кінцевий стан – кластери з ідеальною антиферомагнітною періодичністю. Розмір кластерів залежить від тривалості заднього фронту імпульсу. Для застосувань достатньо 50-100 наноточок/кластер



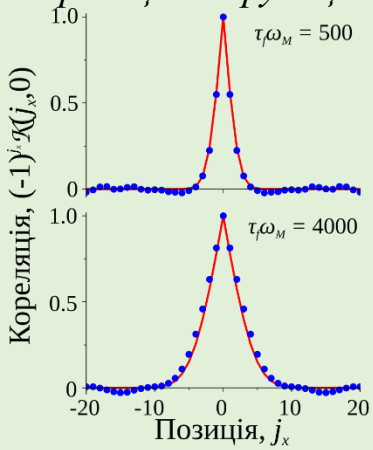
APL **100**, 194212 (2012)

Теорія колективного перемагнічування ґратки

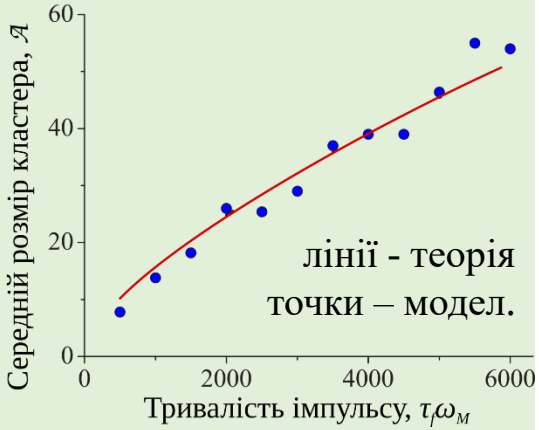


Спектр на границі стійкості проміжного стану. При зменшенні поля починається ***ріст нестійких колективних мод***

Кореляційна функція



Середній розмір кластеру



Статистика кінцевого стану визначається ***ростом нестійкості колективної м'якої моди***. Повільніше зменшення поля → більше часу для розвитку нестійкості в околі мінімуму спектру → менша область спектру встигає стати нестійкою до моменту розвитку сильно нелінійної динаміки. Розмір кластерів $A \sim \tau^{2/3}$.

Phys. Rev. B **87**, 134419 (2013).

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ОПИС МЕТАМАГНІТНИХ СПЛАВІВ

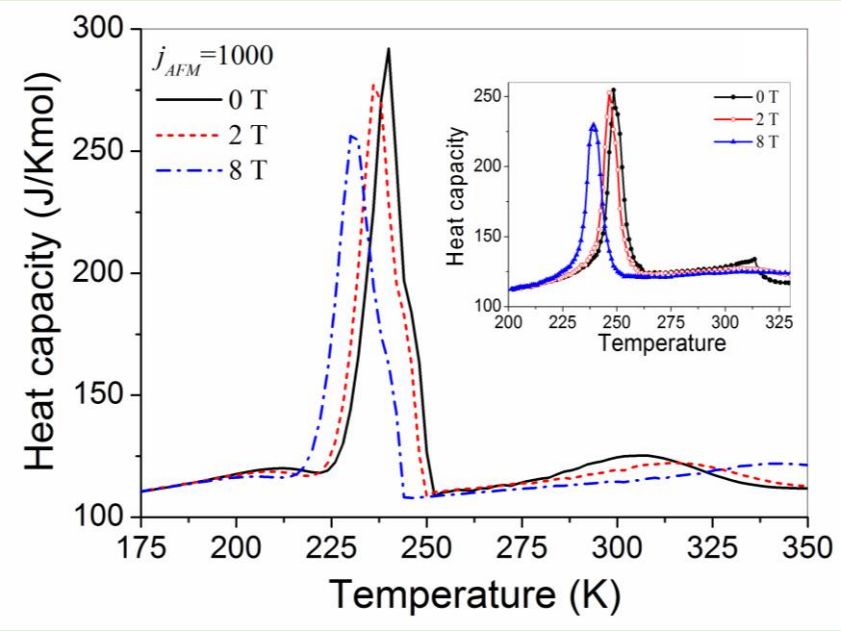
Термодинамічний підхід до опису магніто-калоричного ефекту у метамагнітних сплавах

У метамагнітних сплавах принциповою є взаємодія між магнітною підсистемою та ґраткою (магнон-фононна взаємодія)

$$G = G_{el} + G_{mag} + G_{me}, \quad S = -(\partial G / \partial T)_p$$

$$C_p = T(dS/dT)_p \quad \Delta T \approx -\frac{T}{C_P}[S(H,T) - S(0,T)]$$

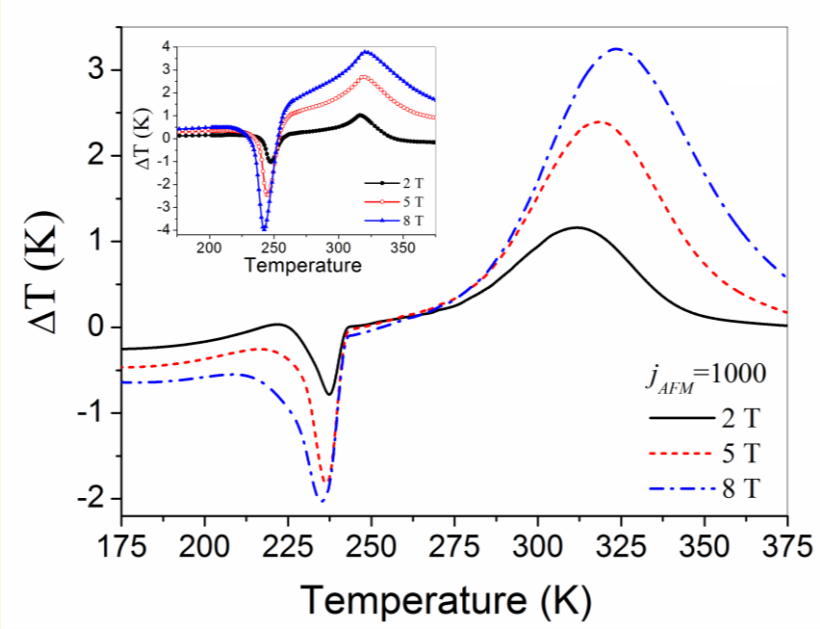
Теплоємність метамагнітного сплаву



Теоретичні та експериментальні (вставка) залежності теплоємності сплаву Ni-Mn-Sn.

Low Temp. Phys. **46**, 764 (2020)

Магнітокалоричний ефект у метамагнітних сплавах



Теорія та експеримент (вставка).

Розроблена теорія дозволяє описати: 1) зміну ентропії в ході мартенситного перетворення сплаву; 2) звичайний та обернений магніто-калоричний ефект, спостережений, відповідно, поблизу температури Кюрі та в температурному інтервалі магнітоструктурного фазового перетворення метамагнітного сплаву; 3) температурну залежність теплоємності метамагнітного сплаву.

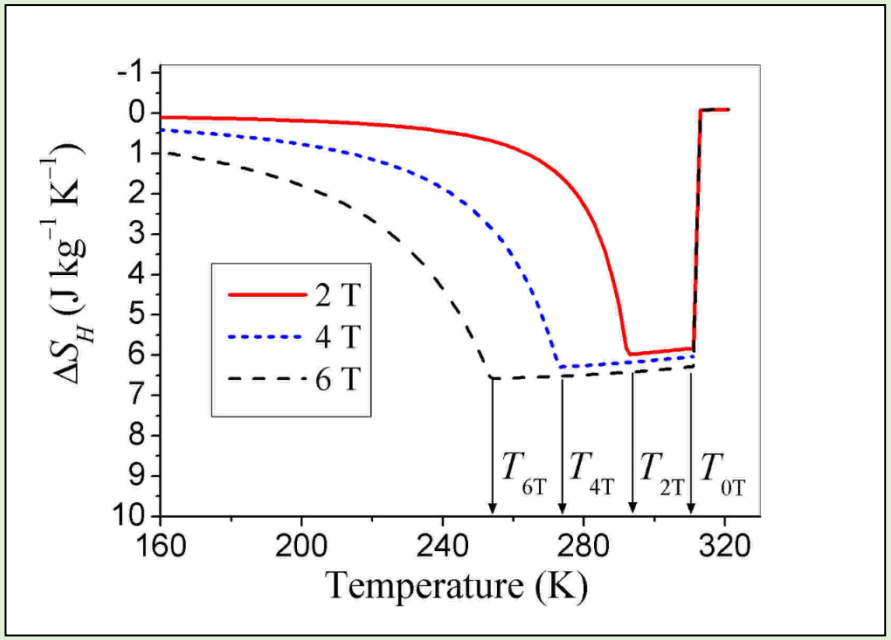
J. Appl. Phys. **119**, 013902 (2016).

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ОПИС МЕТАМАГНІТНИХ СПЛАВІВ

Фазовий перехід феромагнетик-антиферомагнетик у сплавах Fe-Rh:

$$G = \frac{1}{2} J_0^*(\mathbf{M}_1^2 + \mathbf{M}_2^2) + J_{12}^*(T)\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2 - (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2)\mathbf{H}$$

Індукована магнітним полем зміна ентропії



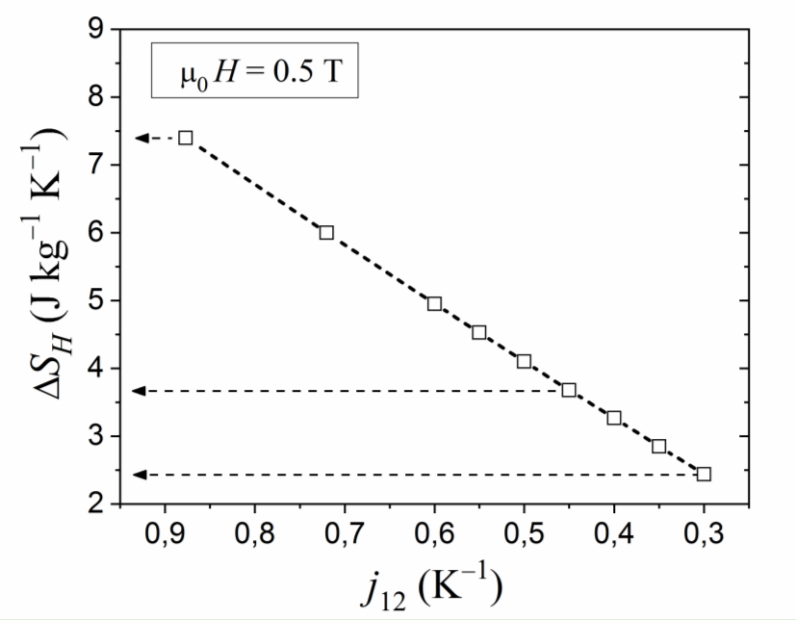
Дані структури є перспективними та ефективними для застосувань у магнітокалириці, а саме у технології ***магнітного охолодження***.

J. Magn. Magn. Mater. **517**, 167269 (2021).

Теорія кількісно описує експериментально спостережені характеристики:

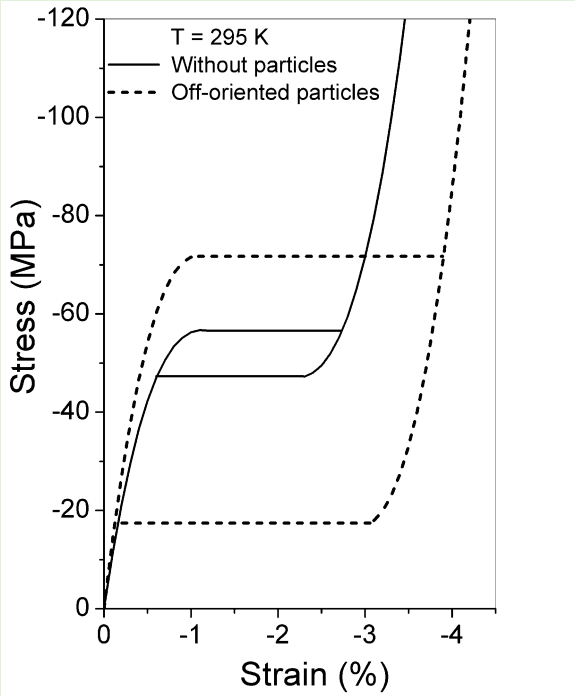
1) розширення інтервалу магнітокалоричного ефекту при збільшенні магнітного поля;
2) наявність горизонтальних сегментів на графіках функцій;
3) максимальне значення ентропії майже однакове для різних значень магнітного поля.

Залежність максимальної зміни ентропії від температурної похідної обмінного параметра, розрахована для магнітного поля 0.5 Т.



ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ МАРТЕНСИТНИХ СПЛАВІВ

Наночастинки у сплаві можуть спонтанно утворюватись у процесі виготовлення (випадіння осадів певної фази), а також контрольовано вводитись до сплаву.



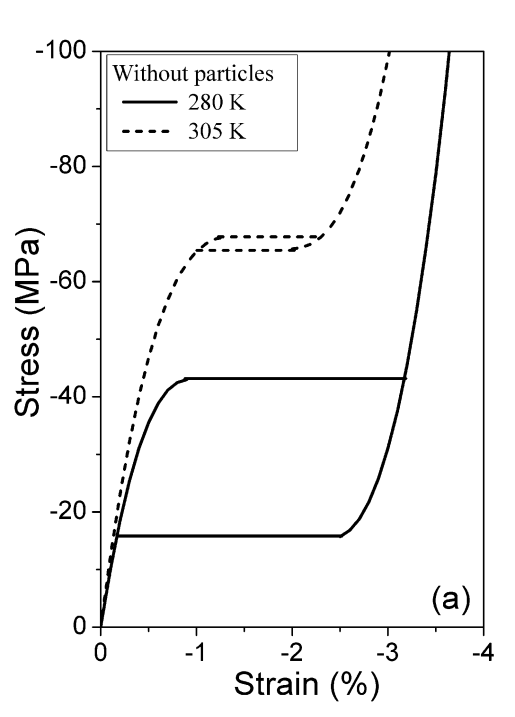
Формування випадково орієнтованих ***наночастинок*** приводить до

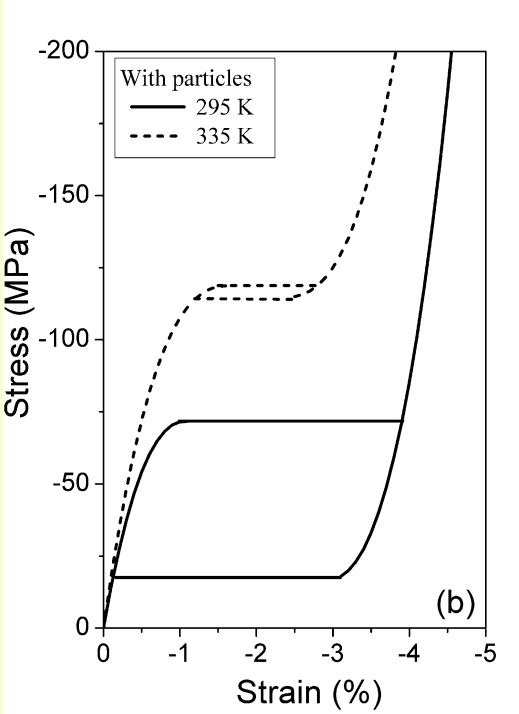
1) ***збільшення критичного напруження***, яке запускає мартенситне перетворення;
2) ***збільшення надпружної деформації***;
3) збільшення величини гістрезису.

Наночастинки сприяють появі високотемпературної надпружності

Залежності деформації від напруження розраховані для сплаву

без наночастинок *з наночастинками*





Введення наночастинок є ефективним інструментом для контрольованої зміни функціональних властивостей мартенситних сплавів.

Mater. Lett. **210**, 252 (2018)
Mater. Sci. Engin. A **776**, 139025 (2020)

ВИСНОВКИ

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

- Вивчено особливості багатомагнонних процесів у магнітних мікро- та наноструктурах, такі як нерезонансність та поява специфічних правил відбору, продемонстровано їх прояви на кривих нелінійного феромагнітного резонансу та польових залежностях напруги спінового ефекту Холла.

- Вперше продемонстровано можливість протікання в магнітних наносистемах процесів, аналогічних процесам кінетичної нестійкості в магнітних плівках, зокрема, збудження найнижчої моди системи при великому рівні накачки, і показано, що ці процеси можуть бути ефективним медіатором конденсації магнонів.

- Запропоновано та досліджено способи підвищення потужності та когерентності генерації спінових осциляторів Холла за рахунок переходу до квазіодновимірної активної зони осцилятора та створення неоднорідного профілю струму накачки. Показано можливість переходу від одномодової до двомодової генерації у спінтронних осциляторах під впливом сильного теплового шуму.

- Запропоновано спосіб створення швидкодіючих магнонних кристалів на основі ґраток наноточок з перебудовою властивостей під впливом коротких імпульсів магнітного поля тривалістю 50-100 нс, що на три порядки швидше за раніше розроблені аналоги. Показано визначальну роль росту нестійкості колективної м’якої моди ґратки та нелінійного обмеження росту нестійкості у процесі перемагнічування.

- 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.

- Розроблена спеціальна версія феноменологічної теорії фазових переходів Ландау для опису впливу наночастинок на властивості мартенситних сплавів. Показано, що мартенситні сплави, які демонструють помітну зміну об’єму під час мартенситного перетворення, є перспективними матеріалами для контрольованого введення наночастинок з метою оптимізації їх властивостей.

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