

На здобуття
Премії Верховної ради України для молодих вчених 2026 року

**ВИСОКОЧАСТОТНА СПІНОВА ДИНАМІКА
В НАНОСИСТЕМАХ ЗНИЖЕНОЇ СИМЕТРІЇ**



Робота представлена
Інститутом магнетизму ім. В. Г. Бар'яхтара НАН України



ВЕРБА

Роман Володимирович

*доктор фіз.-мат. наук,
заступник директора з
наукової роботи,
Інститут магнетизму*



ХАРЛАН

Юлія Ігорівна

*доктор філософії,
молодший науковий
співробітник,
Інститут магнетизму*



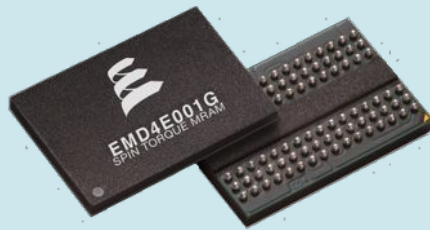
БОРИНСЬКИЙ

Владислав Юрійович

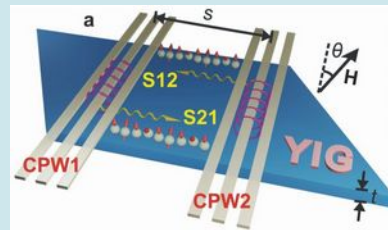
*доктор філософії,
науковий співробітник,
Інститут магнетизму*

Застосування НВЧ магнітної динаміки у наноструктурах (наявні та перспективні)

Запис інформації

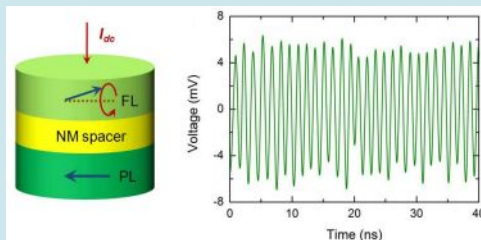
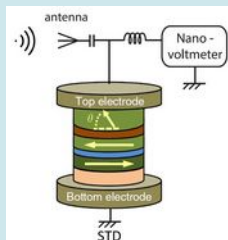


НВЧ електроніка



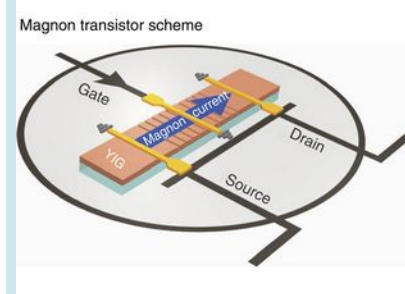
в першу чергу невзаємні та нелінійні пристрої

Спінтронні наногенератори і детектори

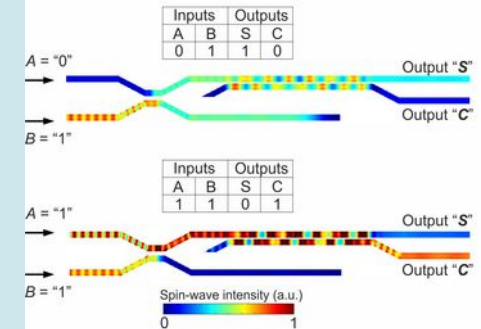


[Zeng et al., Nanoscale 5, 2219 (2013)]

Магنونна логіка



[Chumak, et al., Nat. Comm. 5, 4700 (2014)]

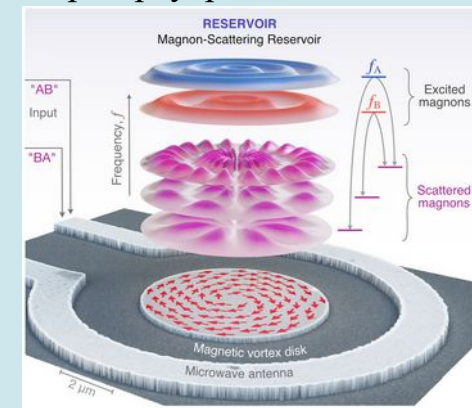
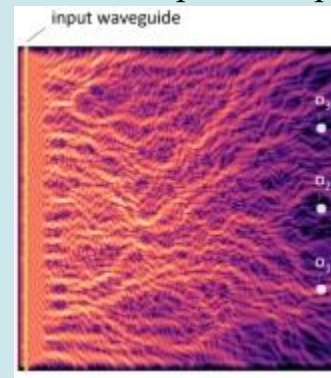


[Wang, et al., Nat. Electron. 3, 765 (2020)]

Небулеві обчислення

хвильові нейронні мережі

резервуарні обчислення



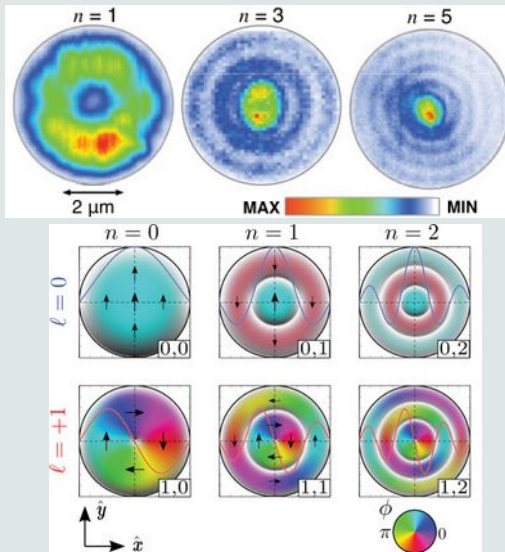
[Á. Papp et al., Nat. Commun. 12, 6422 (2021)]

[Korber et al., Nat. Commun 14, 3954 (2023).]

Лінійна динаміка у магнітних наноточках

Детально вивчено лінійну динаміку, спектр та структуру СХ мод у технологічно простих магнітних нанoeлементax (дисках, прямокутних наноточках, тощо) *у високосиметричних станах*:

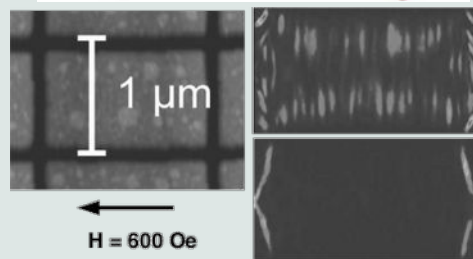
Моди вихору у магнітному диску
[Vogt et al, PRB 84, 174401 (2011)]



СХ моди круглої наноточки з перпендикулярною намагніченістю
[Naletov et al., PRB 84, 224423 (2011)]

Об'ємна та крайова СХ моди намагніченої в площині наноточки
[Jorzick et al., PRL 88, 047204 (2002)]

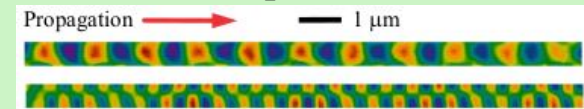
Та багато інших (понад 5000) досліджень.



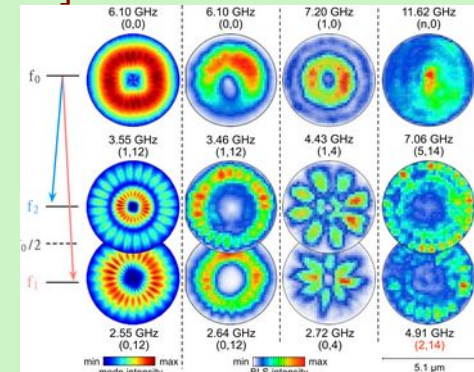
Нелінійна динаміка у наноструктурах

Дослідження почались відносно нещодавно, розглянуто окремі випадки, наприклад:

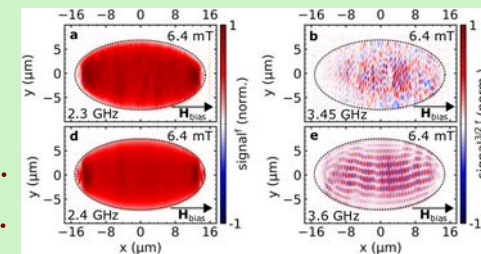
Генерація 2ω
[Demidov et al, Nat. Comm. 15, 1827 (2024)]



Тримагнонний розпад у вихровій наноточці
[Naletov et al., PRB 84, 224423 (2011)]



Багатомангонні процеси при нелінійному ФМР
[Dreyer et al., Nat. Comm. 13, 4939 (2022).]



Спін-хвильова динаміка у плівках

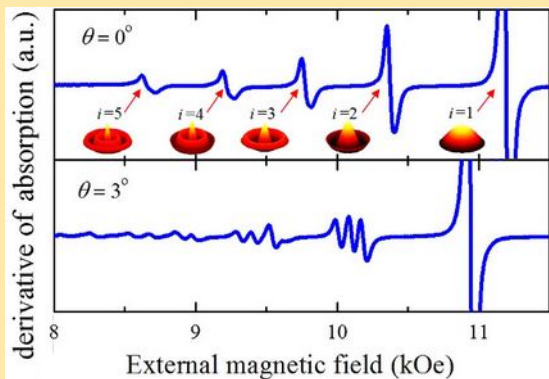
Класичні дослідження

[M.G. Cottam (ed.), 1994; P.E. Wigen, 1994; A.G. Gurevich, G.A. Melkov, 1996; V.S. Lvov, 1994,]

Зниження симетрії структури / магнітного стану переважно призводить до **ускладнення спектру та структури CX**, його “хаотизації”:

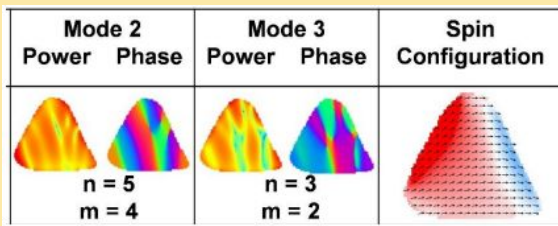
Розщеплення мод при відхиленні намагніченості від нормалі

[Bunyaev et al, Sci. Rep. 5, 18480 (2015)]



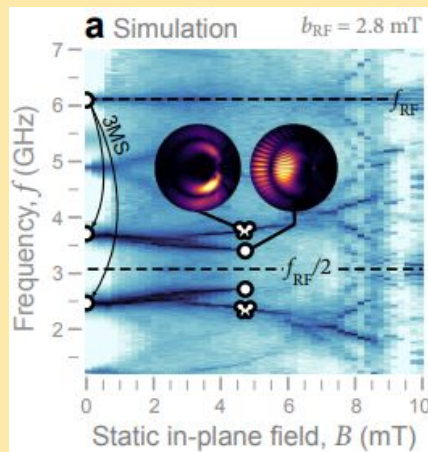
CX моди у трикутній наноточці

[Barman et al., Nanostruct. 165, 116104 (2025)]



Розщеплення мод у магнітному вихорі при зміщенні від центру диска

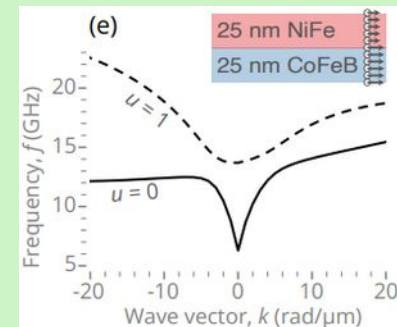
[Korber et al., APL 122, 092401 (2023)]



Якісно нові “позитивні” ефекти при зниженні симетрії

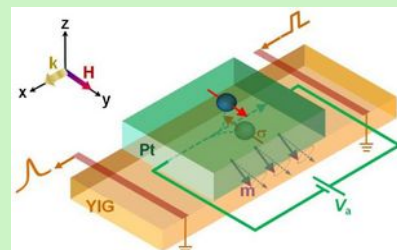
Невзаємність CX

[Heins et al, PRB 111, 134434 (2025)]



Спінкові ефекти Холла та інші спін-орбітальні ефекти на інтерфейсах ФМ - важкий метал

[Wang et al., PRL 107, 146602 (2011)]



та деякі інші.

Зниження симетрії типово призводить до ускладнення структури та спектру спінових збуджень вважається **переважно небажаним ефектом**.

Водночас, відсутність певних симетрій є передумовою **спостереження якісно нових ефектів**.

Мета роботи – встановлення закономірностей лінійної та нелінійної спінової динаміки у магнітних наноструктурах при зниженні симетрії їх магнітного стану, розробка методів керування магнітною динамікою, в першу чергу – на основі контрольованого порушення симетрії магнітного стану, для удосконалення існуючих та створення нових пристроїв спінтроніки та магنونіки

СТРУКТУРА РОБОТИ

**1. Лінійна динаміка у
плівкових
гетеросистемах**

**3. Нелінійні процеси у
наносистемах та
керування ними**

**2. Лінійні СХ моди
наносистем зниженої
симетрії**

**4. Керовані нелінійні
пристрої спінтроніки**

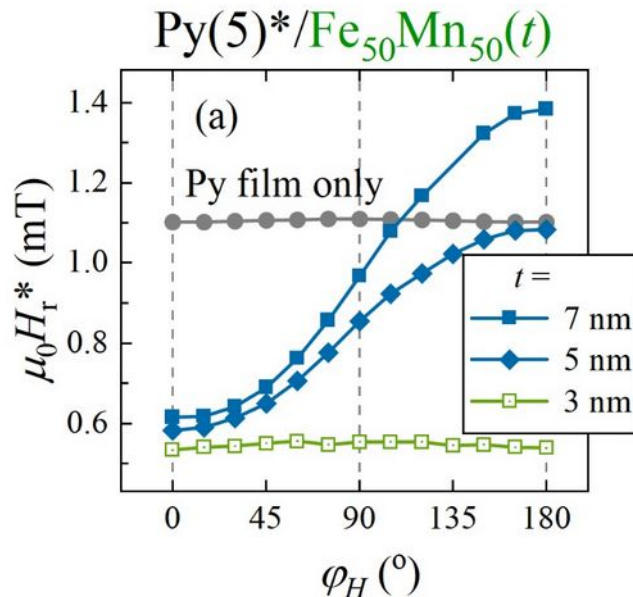
**5. Низькотемпературні
системи**

МАГНІТНА ДИНАМІКА У ПЛІВКОВИХ СИСТЕМАХ

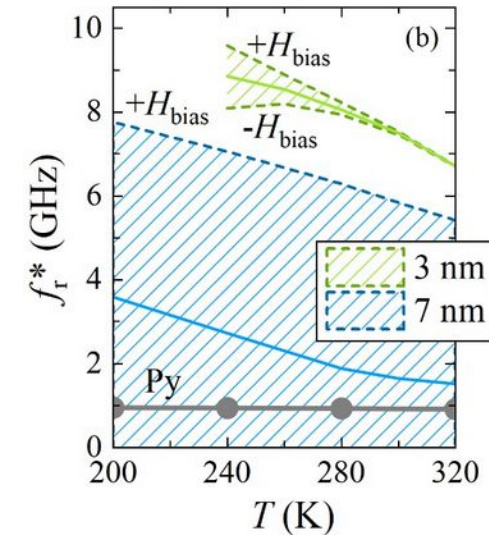
- ізотропне підвищення частоти в структурах ФМ/АФМ
 - гігантська двовісна анізотропія у плівках NiMnGa
- зменшення омічних втрат у спінтронних гетероструктурах

Прямий контакт антиферомагнітного (АФМ) матеріалу з феромагнітним (ФМ) традиційно використовується у магнітних плівкових системах для здійснення двох технологічних задач: наведення поля зміщення, що може відносити магнітну динаміку в інший частотний діапазон; та обмінного закріплення прилеглого ФМ шару для керування спіновою поляризацією і основним станом структури. Усі ці ефекти реалізуються за рахунок обмінної взаємодії на інтерфейсі шарів.

Товщинна еволюція анізотропної поведінки двошарових систем ФМ/АФМ



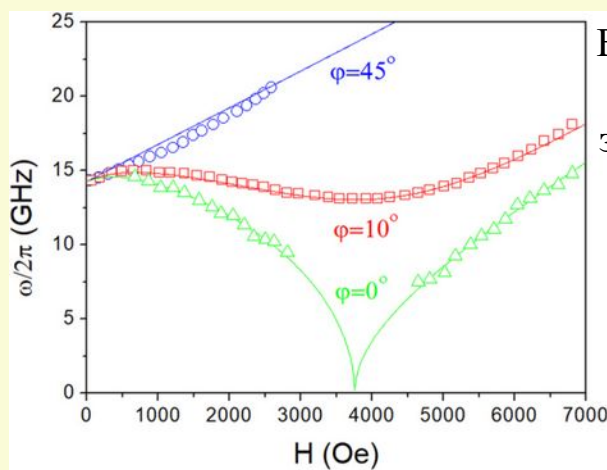
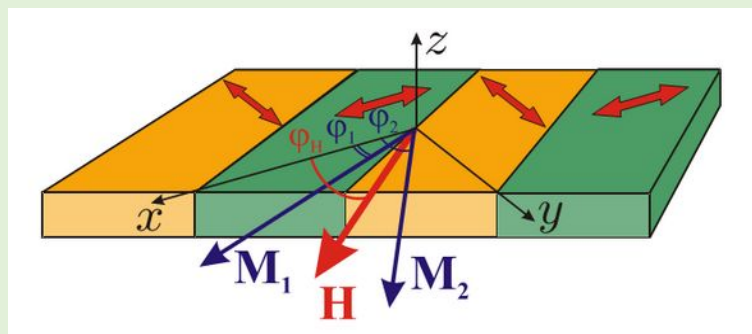
Діаграма ізотропного підсилення частоти однорідних коливань ФМР бішару ФМ/АФМ



Наші дослідження показали, що зменшення товщини АФМ шару до $\lesssim 5$ нм, може спричинити якісно нову поведінку двошарової системи:

- Обмінне закріплення послаблюється, а натомість виникає **обертova анізотропія**, пов'язана з локалізованою поляризацією спінів у тонкому АФМ прошарку.
- **Ефективне поле обротової анізотропії досягає 60 мТл**, що дозволяє досягти суттєвого **ізотропного підсилення резонансної частоти**.

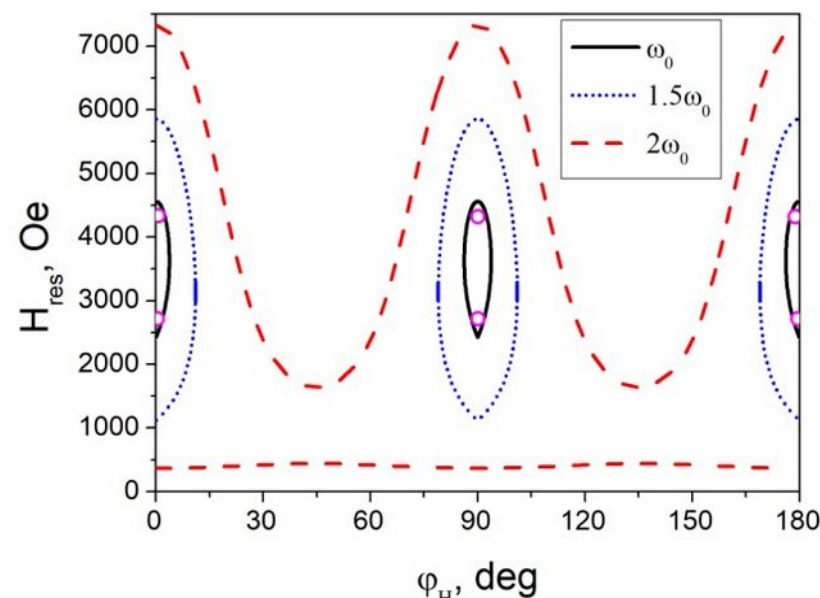
Вперше встановлено, що **спонтанне двійникування** плівки сплаву Гейслера NiMnGa при магнітоструктурному переході та **феромагнітний обмін на границі двійникових компонент** призводить до появи **гігантської (декілька кЕ) двовісної анізотропії (анізотропії четвертого порядку)**.



Експериментальні та теоретичні залежності частот резонансу в площині плівки від зовнішнього магнітного поля для різних кутів φ_H

[APL Materials **11**, 121114 (2025)]

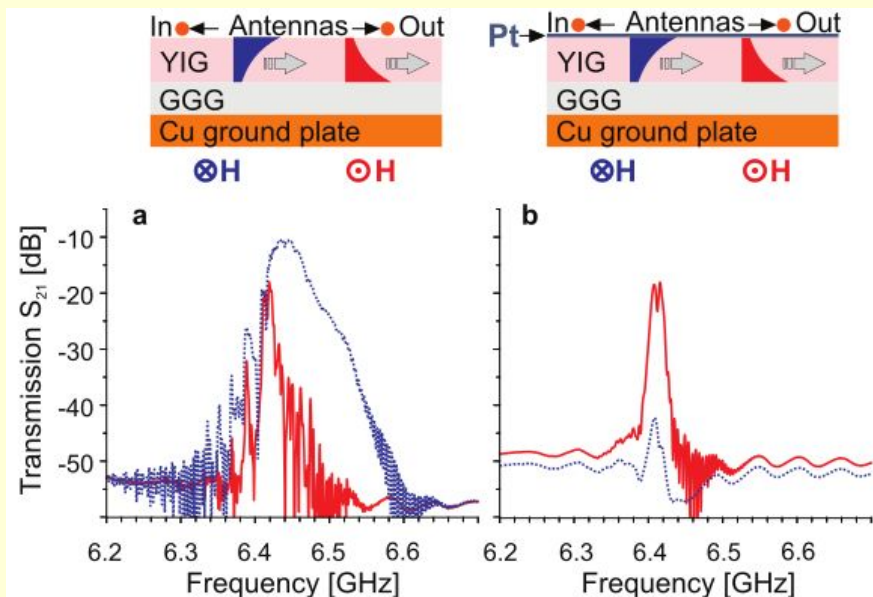
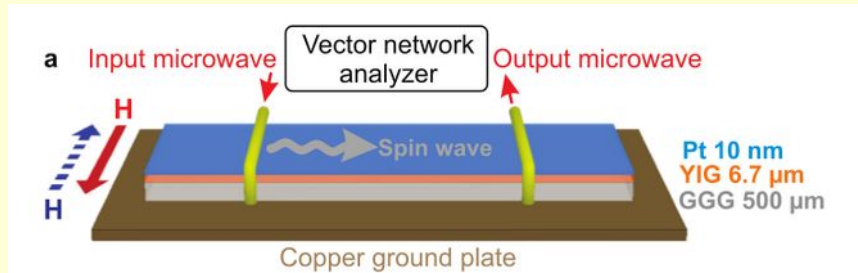
Теоретичні залежності (лінії) резонансного поля від азимутального кута φ_H , розраховані для експериментальної частоти $\omega_0/2\pi=9,46$ ГГц, а також для $1,5\omega_0$ і $2\omega_0$. Символи — експеримент.



Отримані **значення анізотропії є рекордними** для плівкових систем.

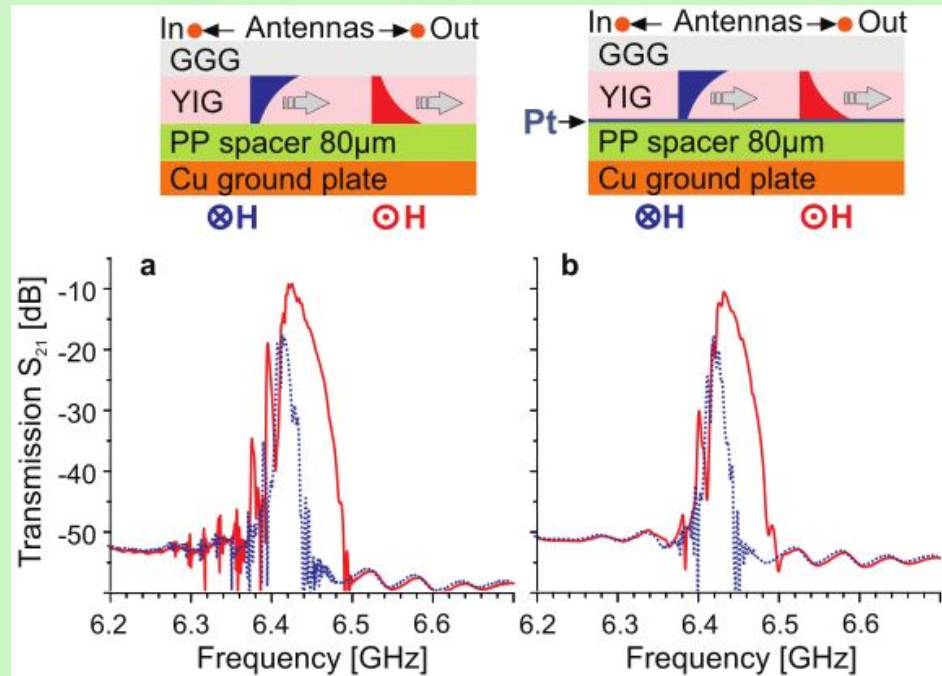
Потенційні застосування: мультібітні комірки пам'яті (4 стани), підвищення резонансних частот, термодеровані резонансні пристрої,

Традиційна геометрія (ферит - важкий метал)



Великі втрати СХ, внесені вихровими струмами у нанорозмірному шарі Pt. → складність створення ефективних структур, що використовують спіновий ефект Холла, ефект спінової накачки у магнітодіелектриках з товщиною $> \sim 100$ нм.

Нова геометрія (метал - діелектрик - важкий метал - ферит)

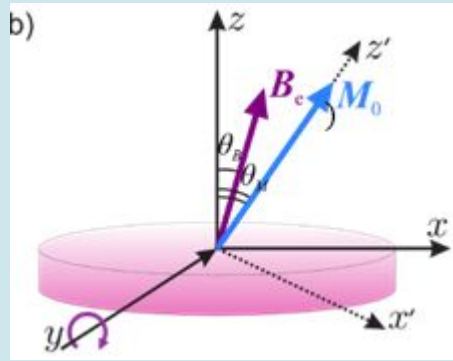


Запропоновано **спосіб зменшення внесених втрат** за рахунок **шунтування вихрових струмів** у нанорозмірному шарі Pt шаром (пластиною) металу з гарною провідністю. Важливо, що ефект зберігається при **відсутності прямого контакту Pt і Cu** (діелектричний прошарок товщиною до десятків мікрометрів), що дозволяє мати **електрично-ізолюваний доступ до шару Pt по постійному струму**. [Adv. Mater. Interfaces 9, 2201323 (2022)]

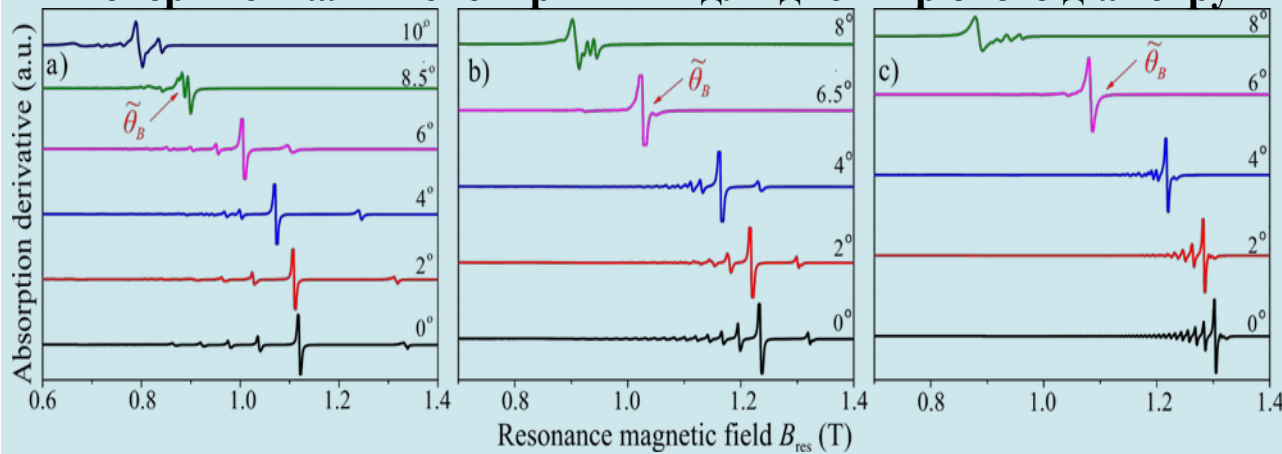
СПІН-ХВИЛЬОВІ МОДИ МАГНІТНИХ НАНОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЗНИЖЕННІ СИМЕТРІЇ

- ефект злиття спін-хвильових мод
- розщеплення мод у багатошарових нанoeлементax
та температурне керування ним
- гібридизація мод у нанoeлементax САФ

Ефект: при певному куті зовнішнього магнітного поля до нормалі *спектр ФМР круглої наноточки містить лише один резонансний пік*. Ефект спостерігається у вузькому діапазоні кутів і більш виражений для дисків більшого діаметру, а критичний кут залежить від діаметру дисків.



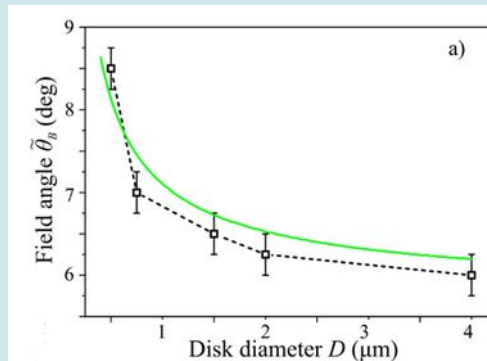
Експериментальні спектри ФМР для дисків різного діаметру



Залежність критичного кута злиття мод від діаметру дисків, символи – експеримент, лінії – теоретична модель.

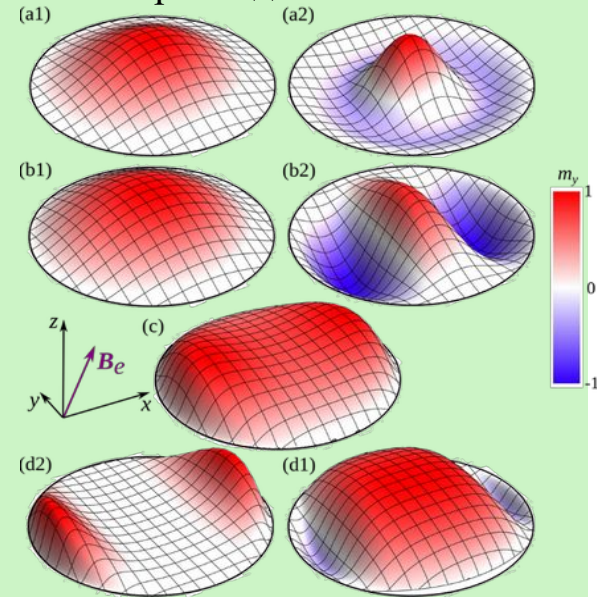
Застосування – **зменшення шумів (звуження спектру шумів)**

[Phys. Rev. B **105**, 014407 (2022)]



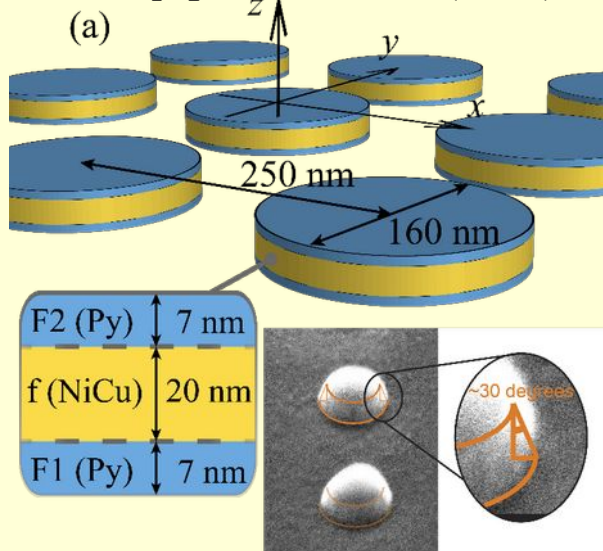
Пояснення

Еволюція профілів мод з кутом прикладання поля



У перпендикулярному стані частота СХ зростає з k_x . Коли поле відхиляється, дисперсійні криві трансформуються у зворотні і при певному куті частина дисперсійних кривих стає майже плоскою. Як наслідок дискретизовані моди стають майже виродженими (в межах ширини лінії).

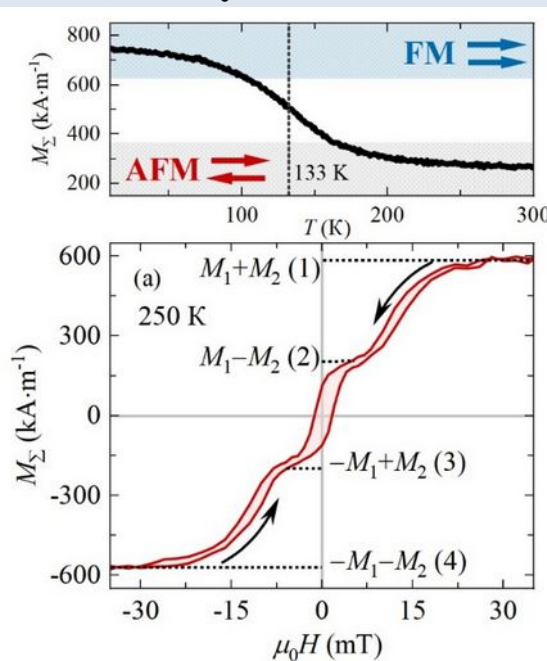
Ілюстрація та СЕМ-зображення планарного масиву синтетичних антиферомагнетиків (САФ)



Дані структури є **дипольними САФ**, в яких антипаралельне впорядкування намагніченості шарів забезпечується дипольною взаємодією між ними.

Виготовлення ідеальних нанoeлементів САФ є складним, типово із використанням літографії та методів напорошення **шари САФ можуть бути неоднаковими** (тут – 15% різниці у діаметрі).

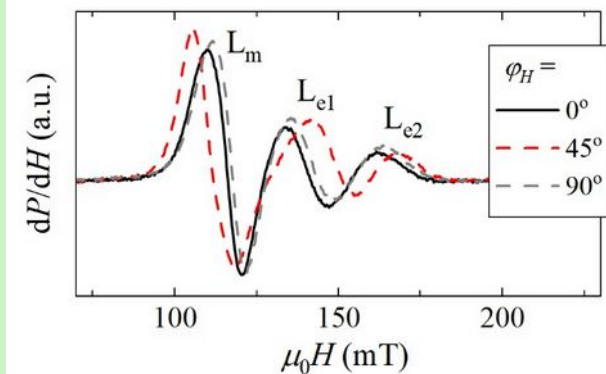
Температурна та польова магнітостатична поведінка масиву нано-САФ



Спостережено **температурне перемикавання між анти- та феромагнітним станами** за рахунок магнітного переходу прошарку слабого феромагнетика NiCu з феро- у парамагнітний стан.

[Low Temp. Phys. **49**, 863 (2023)]

Спектри ФМР у насиченому стані



При площинному намагнічуванні типово очікується збудження двох СХ: основної та крайової.

Проведений нами експеримент вперше продемонстрував **збудження додаткової крайової спин-хвильової моди** за рахунок порушення симетрії у нанoeлементях САФ куполовидної форми.

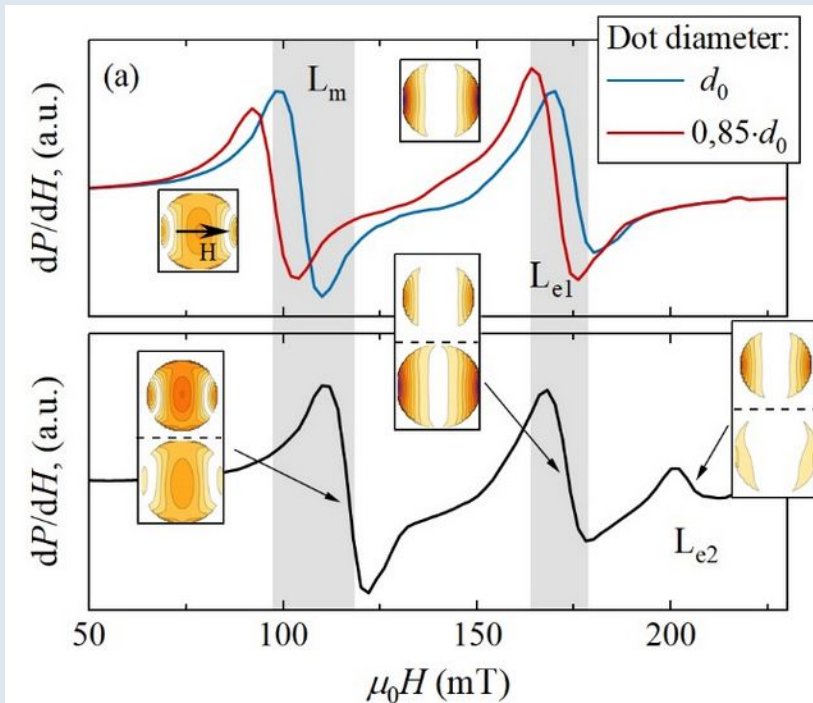
На експерименті феромагнітного резонансу це проявляються як **польове розщеплення двох граничних мод на ~25 мТл**.

[Appl. Phys. Lett. **119**, 192402 (2021)]

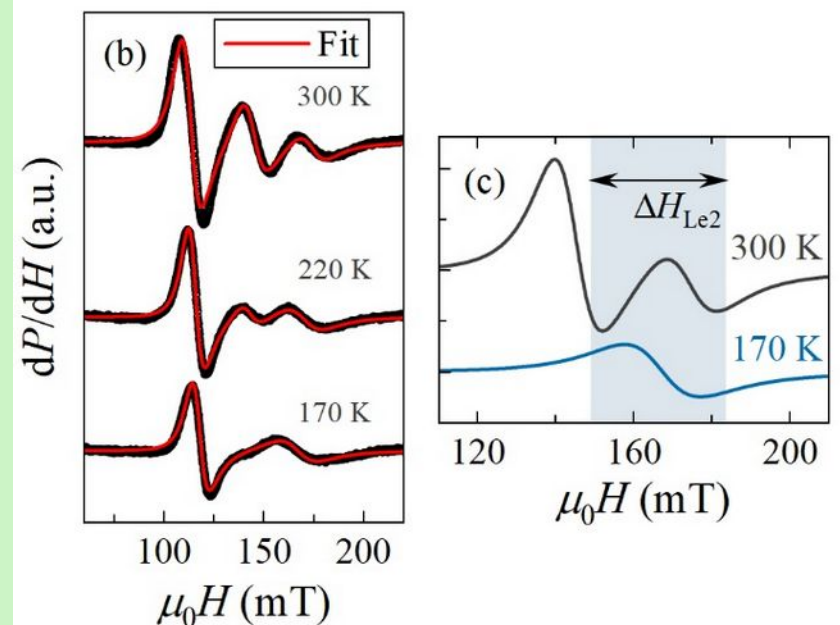
Спостережуване *явище розщеплення граничної моди* було підтверджено шляхом мікромагнітних моделювань

Суперпозиція спектрів двох невзаємодіючих ФМ шарів різного діаметру не призводить до появи додаткових резонансних сигналів; *розщеплення мод – результат взаємодії шарів*

Змодельовані ФМР спектри та профілі мод нанoeлементів САФ



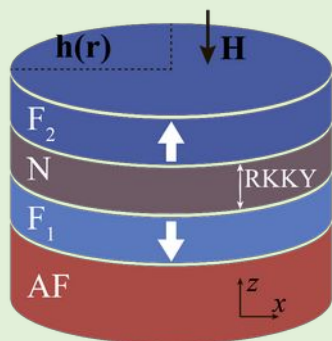
Температурне керування спектром САФ



Завдяки фазовому переходу парамагнітного прошарку NiCu у слабо-феромагнітний стан, дипольною взаємодією між зовнішніми шарами nano-САФ можна керувати за допомогою температури, *ефективно трансформуючи його у однодоменну феромагнітну частинку.*

Нами вперше показано *процес злиття граничних мод* у один вироджений сигнал *за рахунок фазового переходу у nano-САФ.*

Нанoeлемент САФ з міжшаровою РККЙ взаємодією АФМ типу



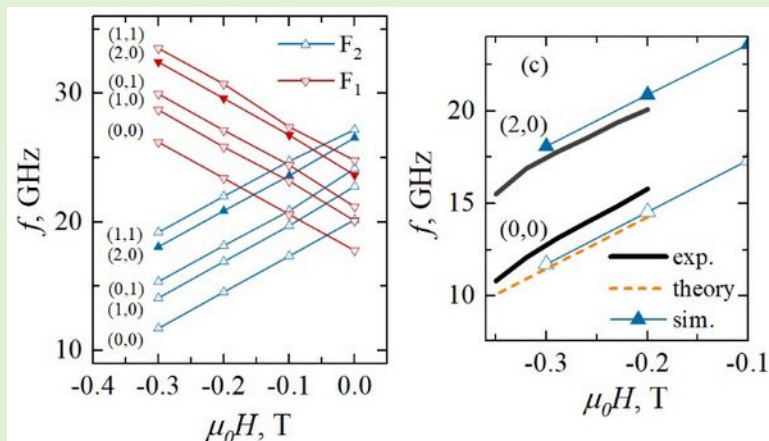
$$M_1 = 955 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$M_2 = 795 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$H_b = -0,2 \text{ Тл}$$

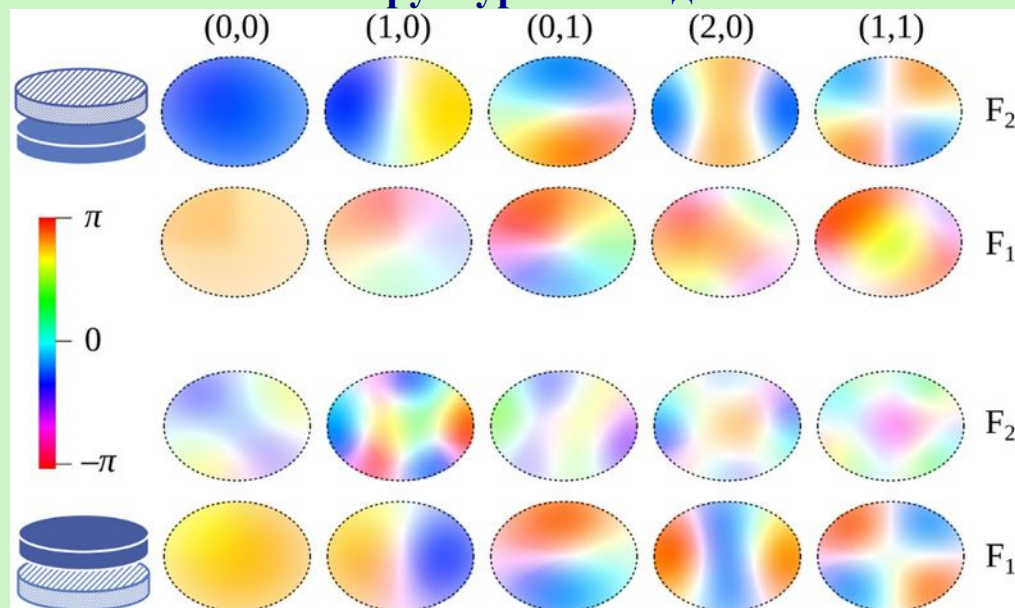
$$H_{pa} = 1,5 \text{ Тл}$$

Польові залежності частот CX мод



Частоти квантованих **CX мод** ведуть себе **аналогічно до плівок САФ** – лінійно зростають/спадають з величиною поля для мод, локалізованих переважно у шарі з паралельною/антипаралельною до поля намагніченістю.

Структура CX мод



CX моди є істотно відмінними від випадку плівкових САФ.

У плівкових САФ – право- та лівополяризовані моди.

У нанoeлементі: Для низькочастотної групи (зверху) – гібридизація мод близької симетрії в шарах, для високочастотної – гібридизація з набором CX мод іншого шару.

Конкуренція РККЙ АФМ обміну та дипольної взаємодії призводить до складної картини гібридизації мод при порушенні симетрії шарів САФ зовнішнім полем.

[Магнітна та термоіндукована динаміка у нанoeлементі синтетичних антиферомагнетиків. Харків: «Діса плюс», 2023]

НЕЛІНІЙНІ ПРОЦЕСИ У МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУРАХ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ

- 1) Тримагнонне розсіяння у магнітних нанотрубках
- 2) Керування тримагнонними процесами
за рахунок порушення симетрії магнітного стану:
 - перші експерименти
 - теорія та методи керування
 - ІВДМ як збурення, що порушує симетрію
- 3) Тримагнонне розсіяння на крайовій моді та керування ним
- 4) Гібридизація мод як шлях до впливу на чотиримагнонну взаємодію

У симетричних структурах – строгі правила відбору тримагнонних (ЗМ) процесів.

У тонких плівках з намагніченістю в площині

частотно-вироджене ЗМ розсіяння ФМР заборонене.

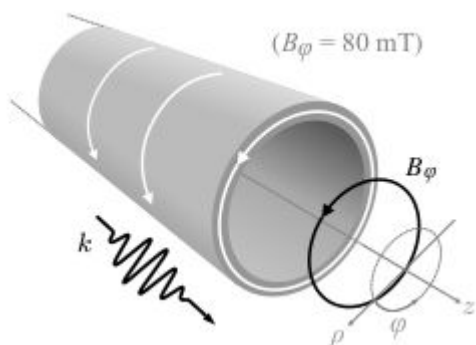
У магнітних вихорах у нульовому полі:

заборонений вироджений розпад радіальної моди

~~$$0 \rightarrow k + (-k)$$~~

~~$$(n, 0) \rightarrow (n_1, m) + (n_2, -m)$$~~

Магнітна нанотрубка у вихровому стані



Спектр СХ

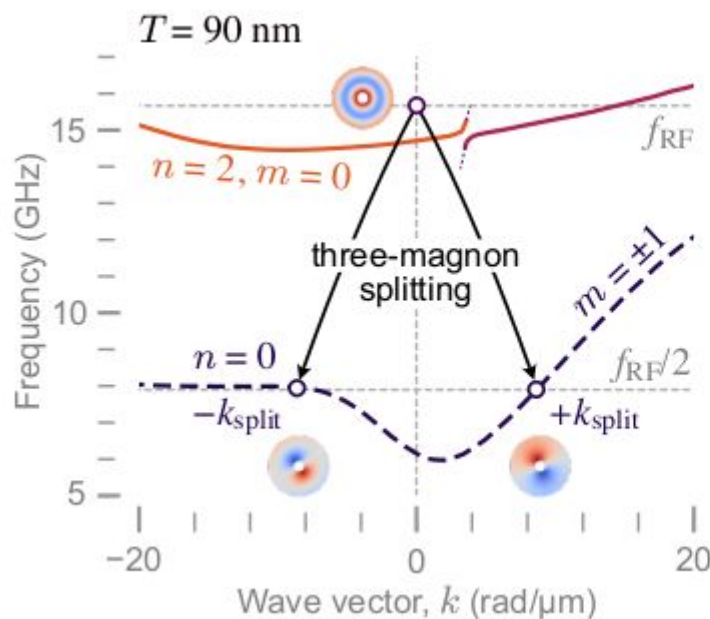
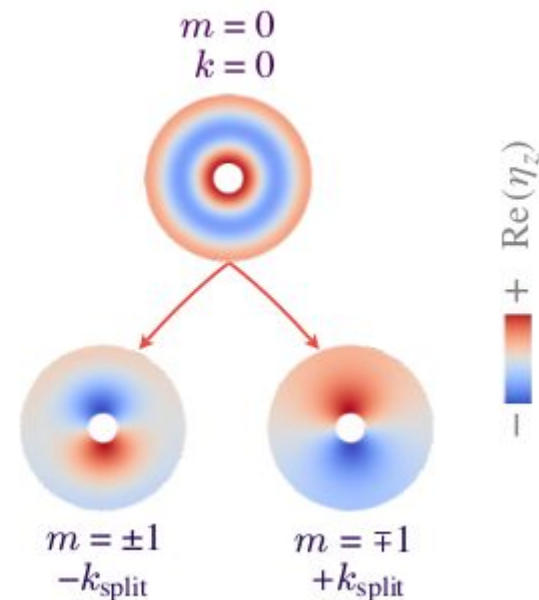


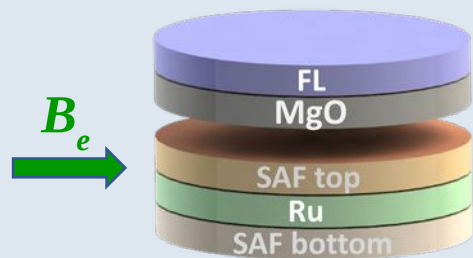
Схема ЗМ процесу



Геометрична кривизна (геометричний магнітостатичний заряд) не тільки призводить до раніше відомої невзаємності спектру СХ, а й **знімає заборону на вироджений ЗМ розпад.**

[Phys. Rev. B 106, 014405 (2022)]

Зразок



FL = $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ (1.8 nm)
MgO (1 nm)
SAF = $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ (2.4)/
Ru(0.85)/ $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ (2.3)
bottom = PtMn (15 nm)
150x100 нм еліптичний переріз

САФ виявляє **бістабільність** – може перебувати у паралельному (П) та спін-флоп (СФ) станах залежно від передісторії.

Ширина лінії нелінійного ФМР (експеримент)

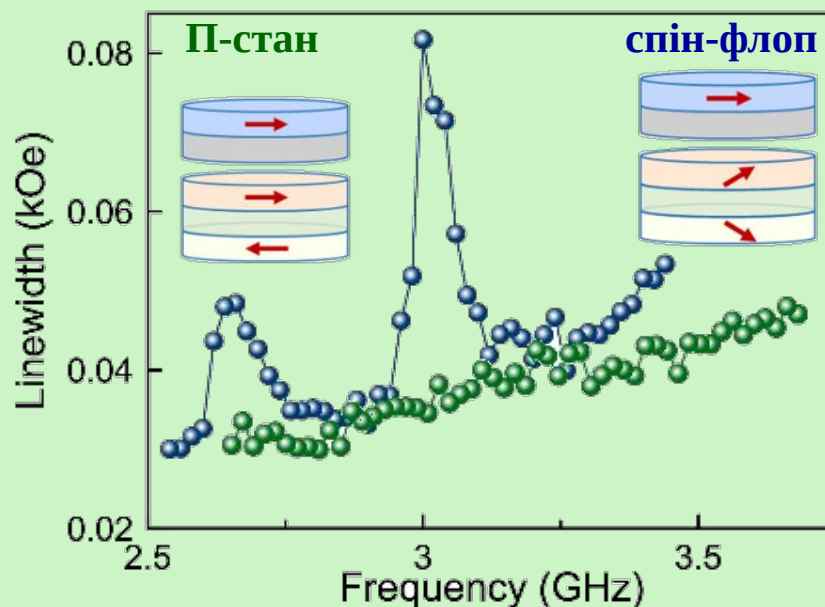
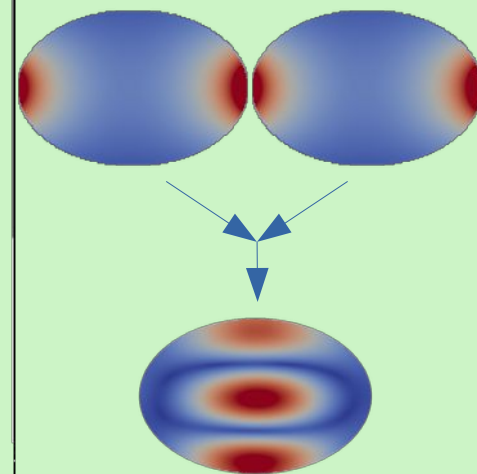


Схема 3-магнонного злиття

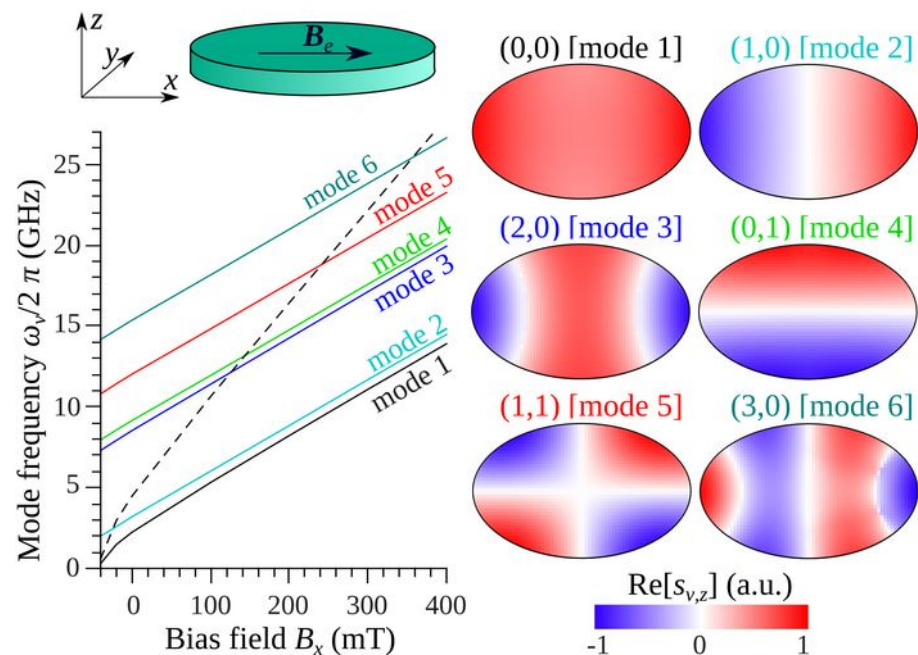


Вперше реалізовано **керування нелінійним затуханням** за рахунок зміни інтенсивності 3-магнонного злиття під впливом полів розсіяння синтетичного антиферомагнетика.

Випадок намагніченої в площині наноточки

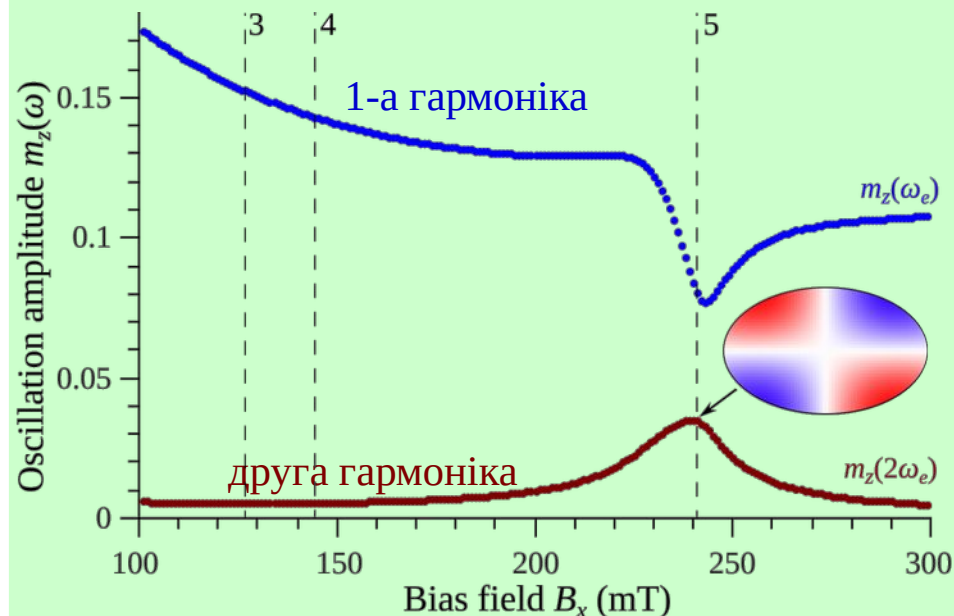
Спектр СХ мод

Профілі мод



У незбуреному стані моди строго симетричні (С) або антисиметричні (А) відносно осей наноточки.

Нелінійний ФМР (модельовання)



Дозволеним є тільки процес тримагнотного злиття у повністю антисиметричну моду

Встановлено **загальне правило відбору тримагнотних процесів:**

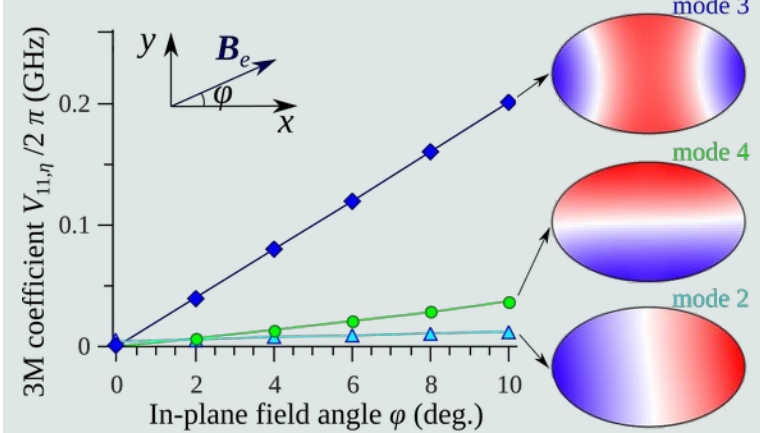
$\sum \nu n_{\nu,x}$ та $\sum \nu n_{\nu,y}$ – непарні.

Причина – антисиметричність недіагональних компонент дипольного оператора

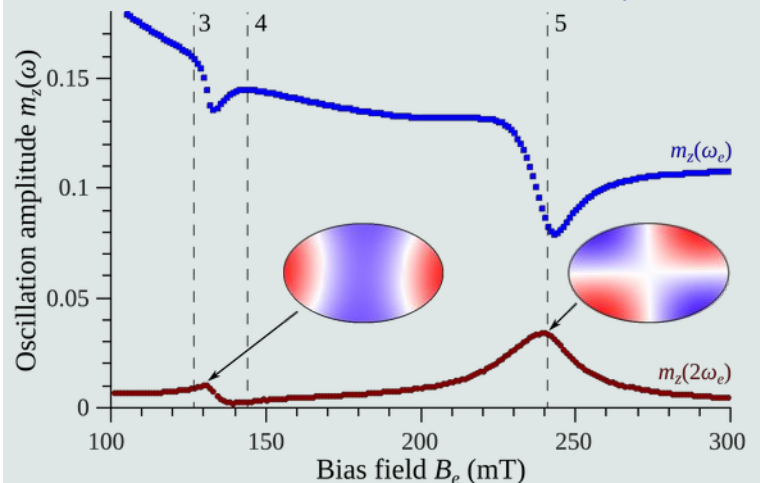
$$\hat{N}_k = \begin{pmatrix} k_x^2 f(kh)/k^2 & k_x k_y f(kh)/k^2 & 0 \\ k_x k_y f(kh)/k^2 & k_y^2 f(kh)/k^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - f(kh) \end{pmatrix}$$

Випадок намагніченої в площині наноточки

Зміна 3-магнотонних коефіцієнтів при нахилі поля в площині



Нелінійний ФМР в нахиленому полі



Відкривається додатковий канал розсіяння

Вплив збурень на процес $(\nu + \nu) \rightarrow 2$

Поле збурення	Симетрія моди 2			
	(C, C)	(A, C)	(C, A)	(A, A)
Без збурення	-	-	-	+
B_y, B_z однорідне/симетр.	+	слабк.	слабк.	+
$\Delta B_x(x)$ антисиметричне	-	-	+	+
$\Delta B_x(y)$ антисиметричне	-	+	-	+
$B_x(x,y)$ антисиметричне	+	+	+	+
$B_y(x)$ або $B_z(x)$ антисим.	-	+	-	+
$B_y(y)$ або $B_z(y)$ антисим.	-	-	+	+
$B_y(x,y) / B_z(x,y)$ антисим.	-	-	-	+
ІВДМ	-	+	-	+

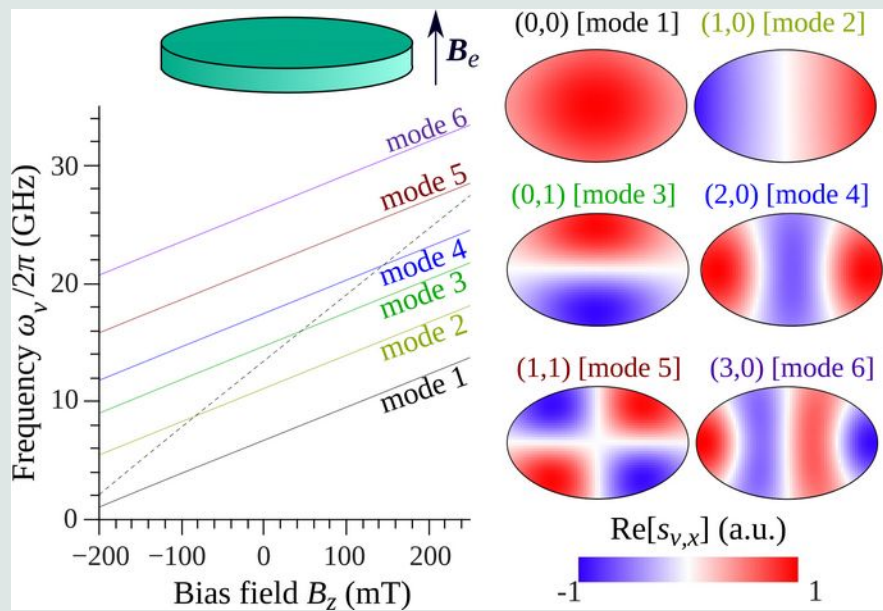
Збурення, що порушують симетрію магнітного стану та/або СХ мод, **знімають заборону на 3-магнотонні процеси.**

Систематизовано вплив збурень **всіх можливих симетрій** на вироджений тримагнотонний процес.

Більшість збурень мають **селективний вплив.**

Випадок перпендикулярно намагніченої наноточки

Спектр та структура СХ мод



У незбуреному стані моди схожі на попередній випадок намагніченої у площині наноточки.

Однак **тримагنونні процеси заборонені взагалі**, оскільки немає зв'язку між статичною та динамічними компонентами намагніченості.

$$\hat{N}_k = \begin{pmatrix} k_x^2 f(kh)/k^2 & k_x k_y f(kh)/k^2 & 0 \\ k_x k_y f(kh)/k^2 & k_y^2 f(kh)/k^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - f(kh) \end{pmatrix}$$

Вплив збурень на процес $(1 + 1) \rightarrow \nu$



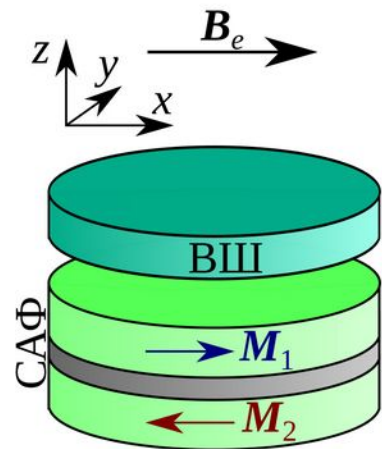
Величина збурень 10 мТл,
стала ІВДМ $Db/h = 0.05$ мДж/м².

Збурення відкривають канали 3-магنونного розсіяння.

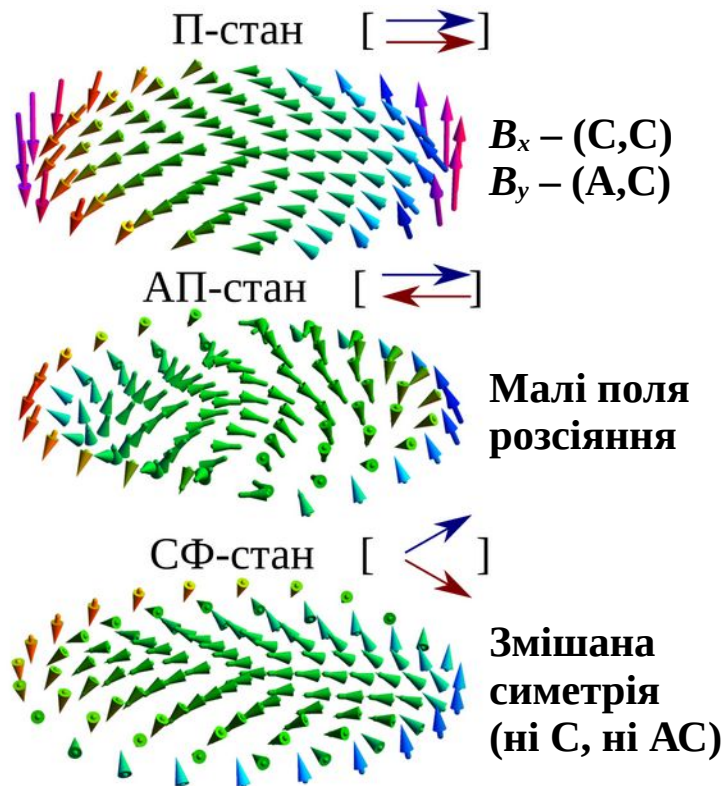
2 групи мод – повністю симетричні/антисиметричні та змішаної симетрії – **які чутливі до різних збурень**. В середині групи немає селективності.

Необхідні поля збурення для істотної зміни ефективності 3-магнетонної взаємодії ~ 10 мТл.

Наностовпчик
САФ / ВШ
(вільний шар)



Поля розсіяння САФ у ВШ
у різних станах САФ



Синтетичний антиферомагнетик (САФ) може існувати у різних станах: паралельному (П), антипаралельному (АП), і спін-флоп (СФ), у тому числі існує **бістабільність** (гістерезис). Істотно **різна симетрія полів розсіяння** дозволяє використовувати зміну стану САФ (імпульсом поля/струму) **для керування тримагнетонними процесами у ВШ**. Це пояснює перший експеримент по зміні нелінійного затухання у ВШ при перемагнічуванні САФ.

Інші можливі альтернативи: перехід вихор - насичений стан, одно-/багато domenний стан, тощо.

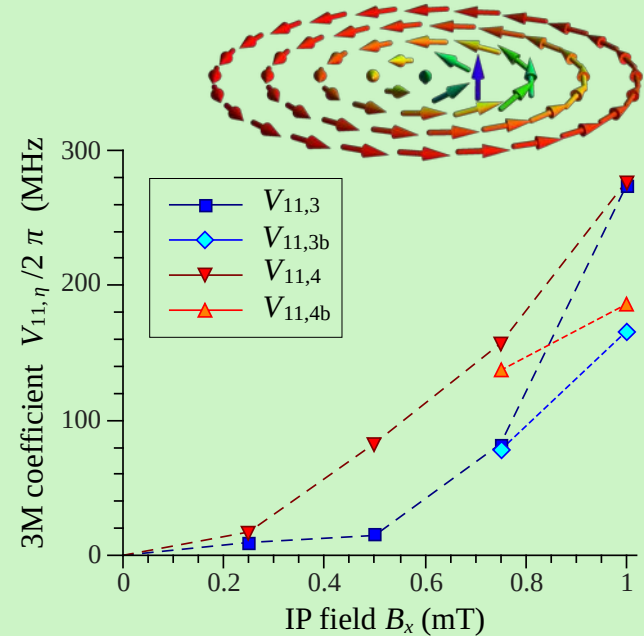
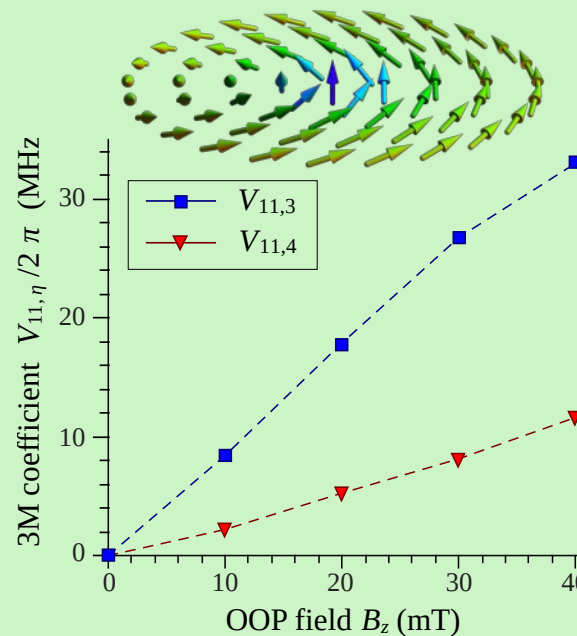
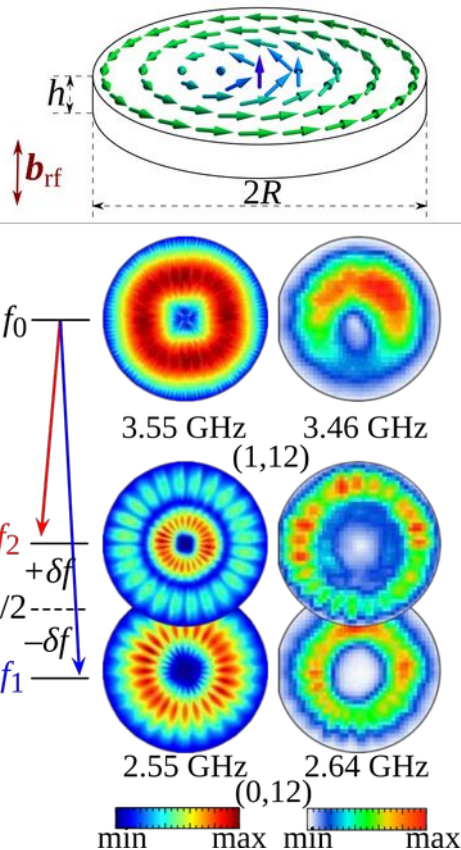
Розглянуті процеси: $(1, 0) + (1, 0) \rightarrow (3, 0)$ та $(1, 0) + (1, 0) \rightarrow (4, 0)$

В ідеальному вихорі – заборонені.

Відповідають за нелінійне згасання та 2ω .

Перпендикулярне поле збурення

Поле збурення в площині



Відомо, що тільки невинроджені процеси дозволені у незбуреному вихорі

Встановлено, що збурення вихрового стану скасовують заборону на невинроджені тримагнонні процеси. Збурення у площині (зсув ядра вихору) є набагато більш ефективним методом впливу на тримагнонні процеси.

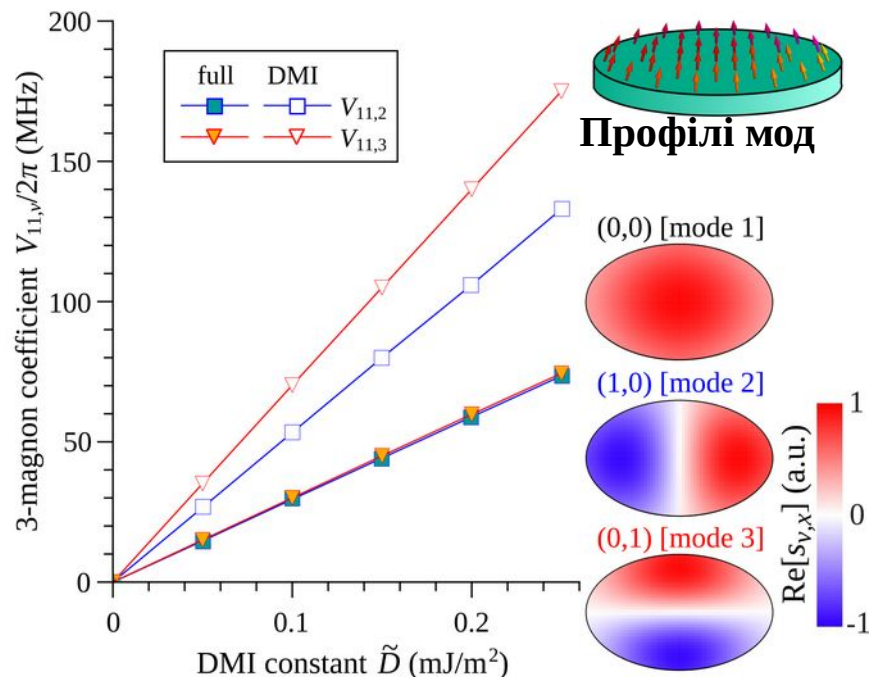
Селективного впливу не виявлено.

Інтерфейсна (міжфазна) взаємодія
Дзялошинського-Морія (ІВДМ) –
антисиметрична обмінна взаємодія, присутня
на інтерфейсах феромагнетик-важкий метал

$$W_{\text{IDMI}} = (\tilde{D}/M_s^2) [M_z \nabla \cdot \mathbf{M} - \mathbf{M} \cdot (\nabla M_z)]$$

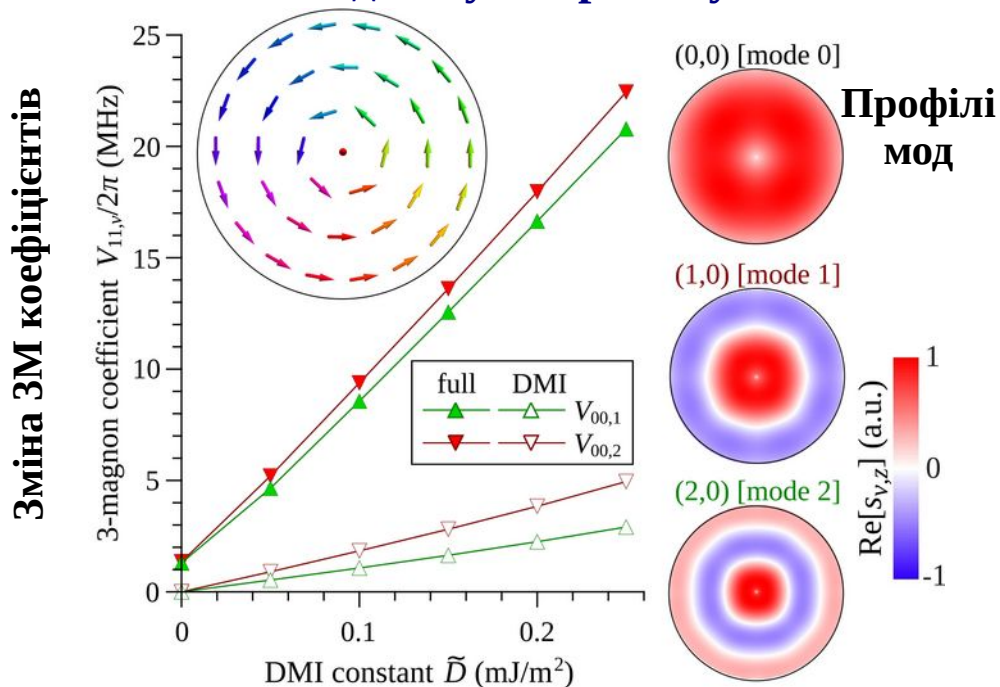
Перпендикулярно намагнічена наноточка

Зміна 3М коефіцієнтів



[Фіз. низьких темп. 51, 1094 (2025)]

Магнітний диск у вихровому стані



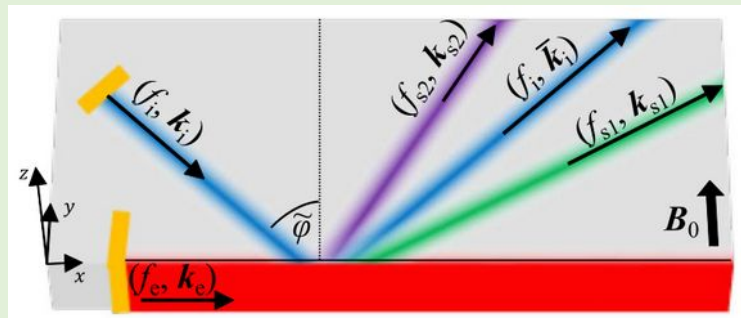
ІВДМ чинить **сильний ефект** на тримагнонні процеси =

Σ прямого внеску + непрямого через зміну статичного стану.

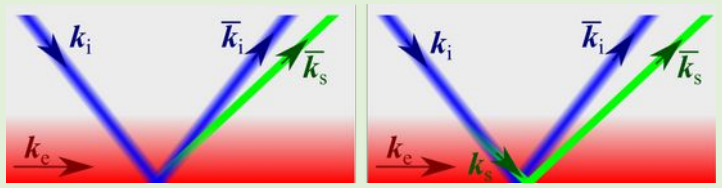
ІВДМ присутня у більшості спінтронних структур
→ **можливі ускладнення в інтерпретації результатів та керуванні.**

Електрично керована ІВДМ → **новий шлях керування**

Схема розсіювання хвиль



2 парціальні процеси:
розсіювання після відбиття
і до відбиття



Ефективний тримагнетний
коефіцієнт

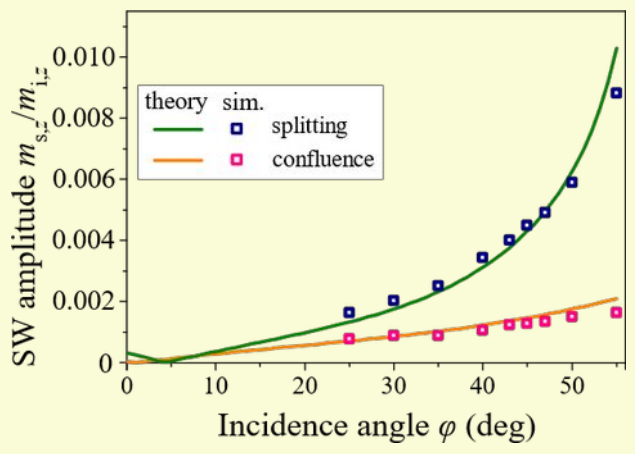
$$V_{\text{conf}} = V_{ie,s} e^{i\phi_s} + V_{i\bar{e},\bar{s}} e^{i\phi_i}$$

ϕ_α – набіг фази при відбитті

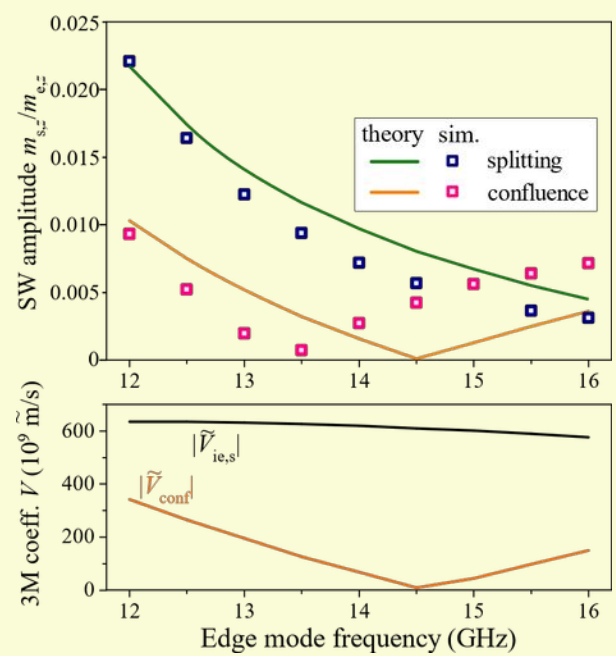
Амплітуда розсіяної хвилі

$$|c_s| = V c_i c_e (\varepsilon v_s)^{-1} e^{-\Gamma y / v_s}$$

Залежність від кута падіння



та частоти крайової моди

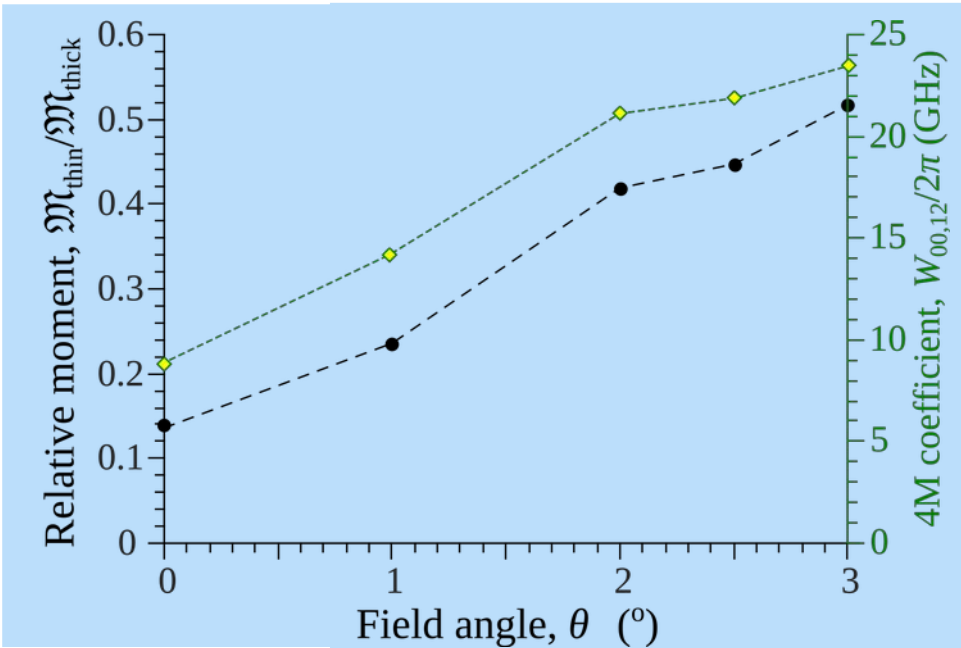
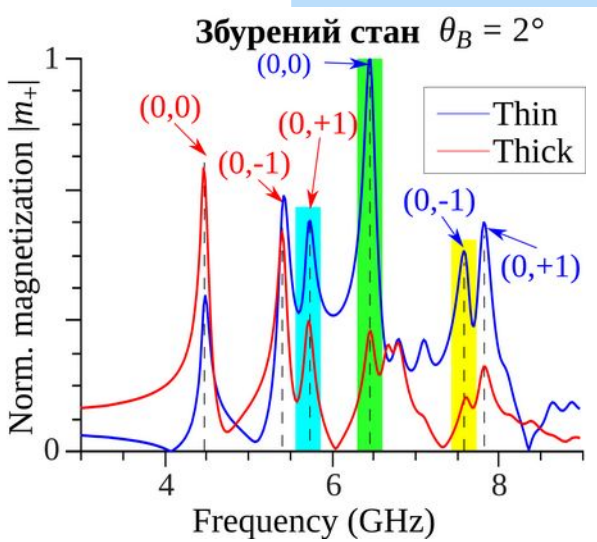
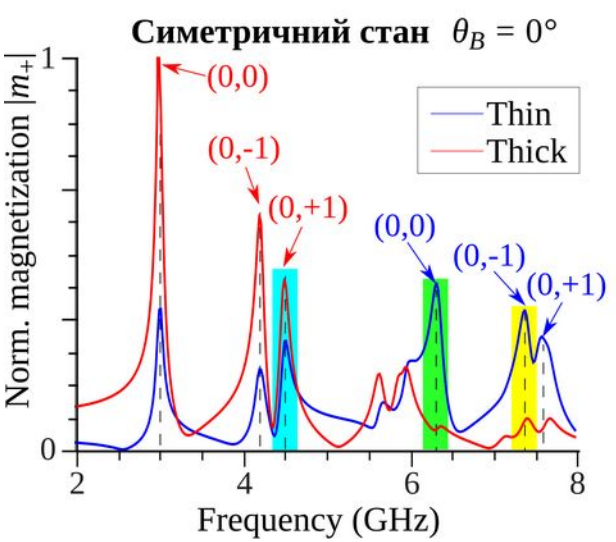
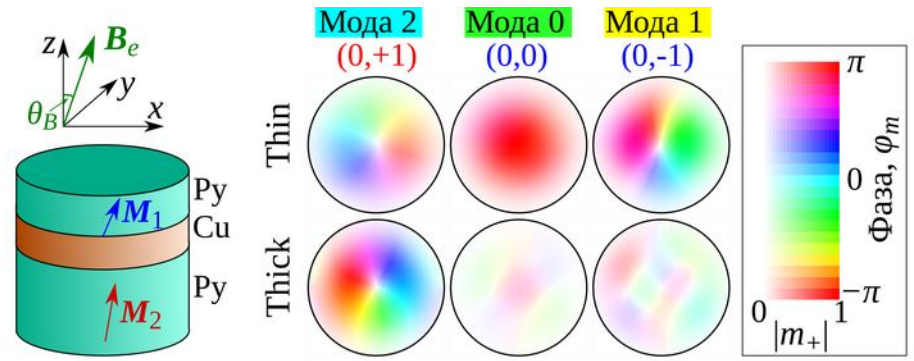


Загальний тренд ефективності ЗМ розсіювання $V \sim \sin[2\varphi]$. Амплітуда розсіяної хвилі обернено пропорційна до проекції групової швидкості розсіяної хвилі → додаткова кутова залежність.

Встановлено принципову роль **інтерференції парціальних хвиль** → сильна чутливість до частот СХ = **спосіб ефективного керування**

Керування 4М процесами значно складніше.
Симетрійні правила відбору типowo відсутні.

Двошаровий магнітний наностовпчик



Можливий процес – сулівська нестійкість 2-го порядку

$$0 + 0 \rightarrow 1 + 2$$

Збурення (нахил поля від нормалі) **сильно змінює ступінь гібридизації мод** між шарами.

Наслідок: **зміна 4-магнонного коефіцієнту у понад 2 рази при 3° = ефективний метод впливу на 4М процеси**

КЕРОВАНІ НЕЛІНІЙНІ ПРИСТРОЇ МАГНОНІКИ ТА СПІНТРОНІКИ

- 1) Магنونний транзистор на основі 3М розсіяння
- 2) Керований багатомодовий спінтронний осцилятор
- 3) Нелінійний спінтронний підсилювач

Будова та робота магнонного транзистора

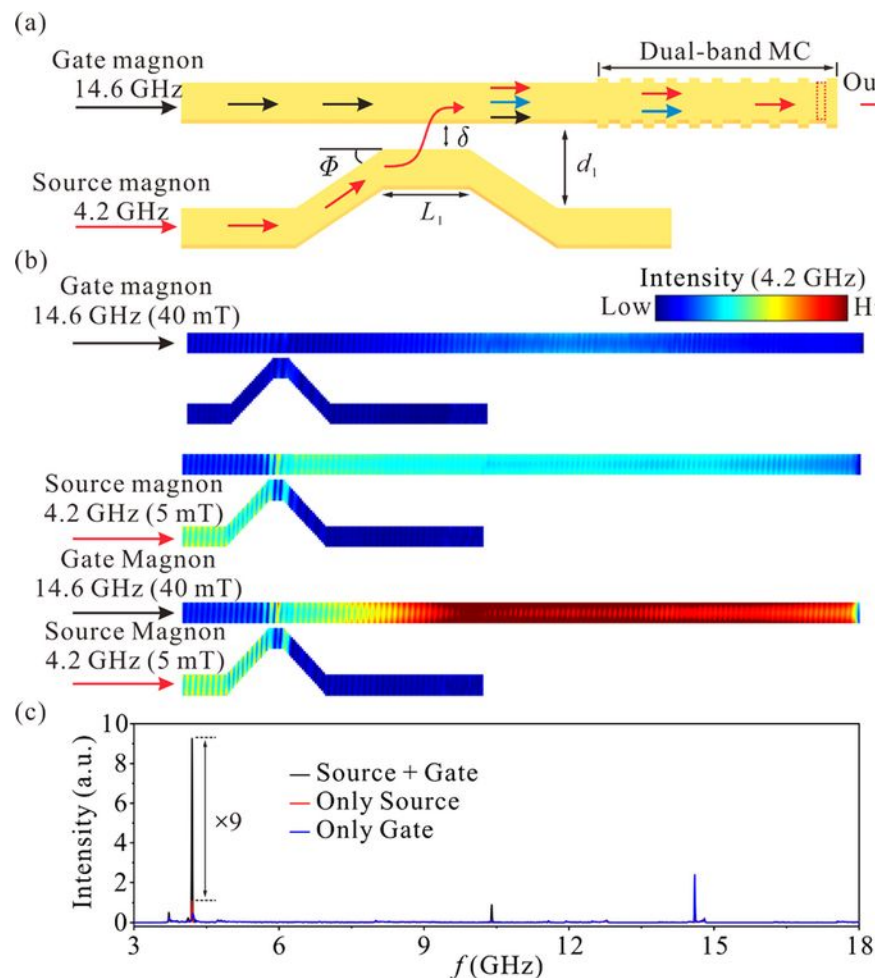
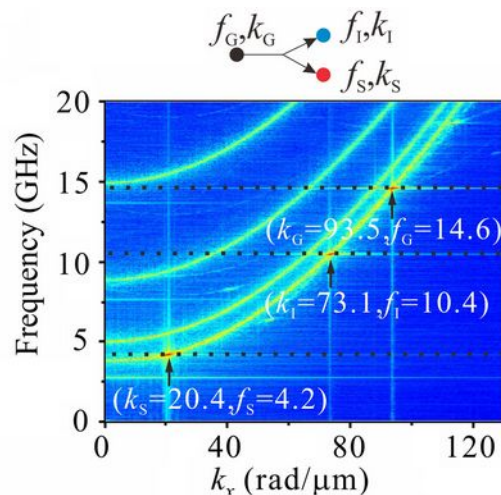
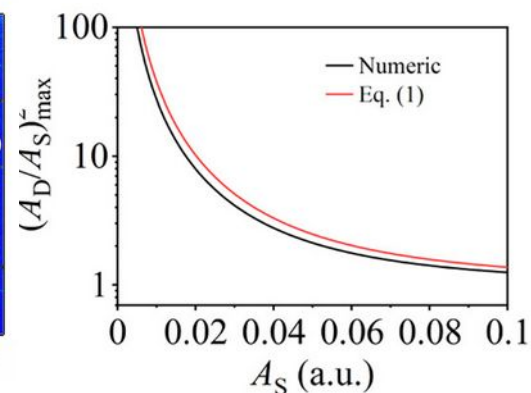


Схема 3М процесу



Коефіцієнт підсилення

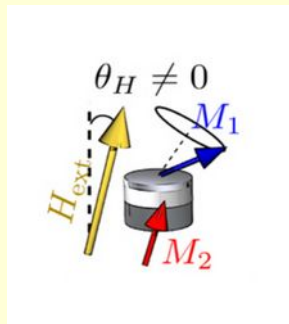


Ефективність 3М процесу

$$V \approx \frac{\omega_M \sin 2\varphi_M}{4\sqrt{2}} (f(k_1 t) + f(k_2 t))$$

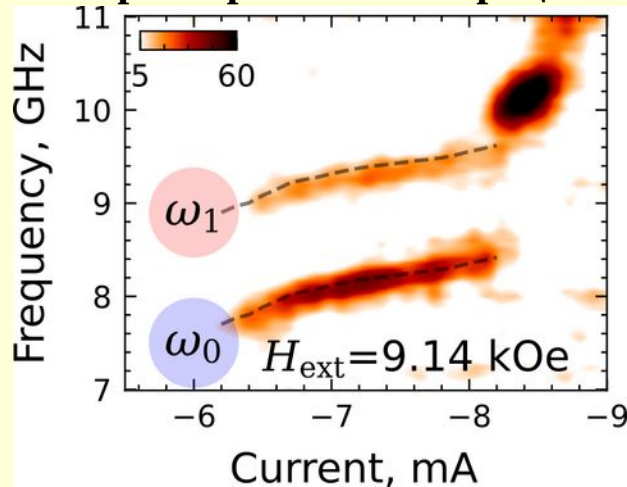
Числовими методами продемонстровано роботу **магнонного транзистора** на основі стимульованого тримагнонного розщеплення. Для змішування сигналу та накачки використовується магнонний відгалужувач, а для фільтрації холостих магнів та накачки на стоці транзистора – двосмуговий магнонний кристал. Досягнуто **коефіцієнт підсилення = 9**. Фаза стокових магнів залежить тільки від фази вихідних магнів.

Експериментальні спостереження



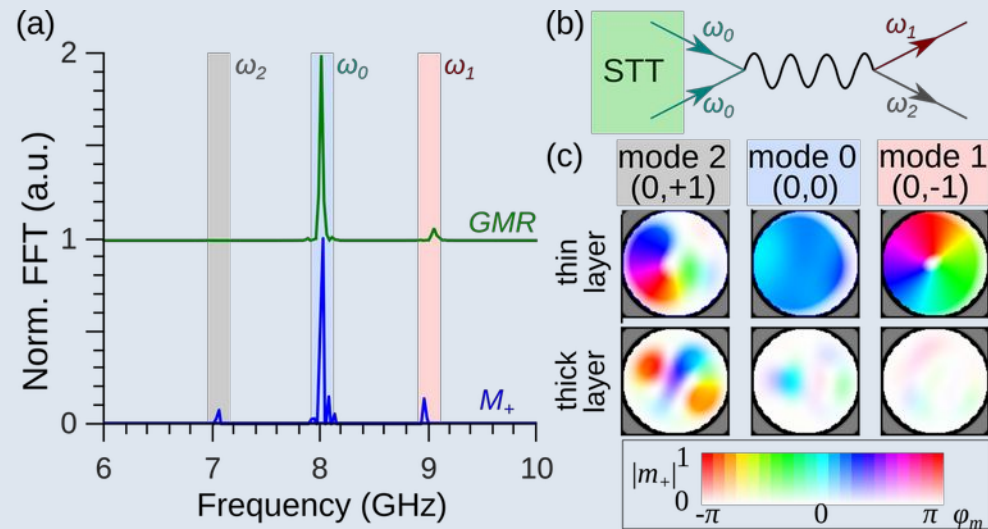
Зразок:
спінтронний
наноосцилятор (СНО)
Cu60|Py15|Cu10|Py4|Au25
діаметр 250 нм
прикладене поле — 2° до
нормалі

Характеристика генерації



Спостерігається **стійка одночасна двомодова генерація** у певному діапазоні струмів. Це **нетипово для автогенераторів** – зазвичай, виживає лише одна мода, або існують биття між різними модами. При перпендикулярному намагнічуванні двомодова генерація зникає.

Мікромагнітне моделювання



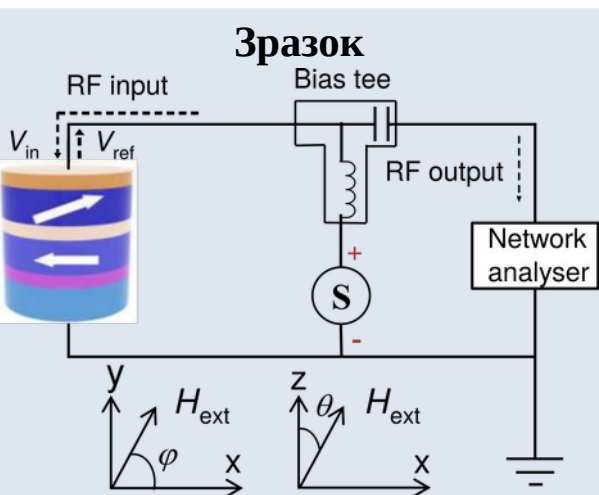
У спектрі коливань намагніченості є **3-я мода**, яка не дає сигнал магнітоопору. Процес — **4-магنونний розпад** однорідної моди на пару азимутальних мод.

Виявлено та пояснено стійкий режим багатомодової генерації у СНО на базі наностовпчиків. Умова – наявність нижчої за частотою моди з більшим порогом збудження – забезпечується завдяки гібридизації власних мод шарів СНО, що зумовлює чутливість генерації до зовнішніх умов.

→ **керований наногенератор, +, можливо, кросс-модова синхронізація СНО.**

Побудова гібридних спінтронно-КМОН систем потребує зв'язкових елементів, зокрема підсилювачів малих сигналів спінтронної підсистеми.

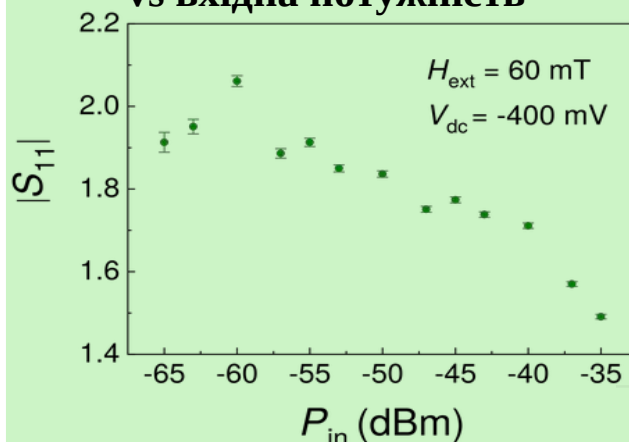
Відомі пасивні аналоги використовують термомагнітні ефекти і є складними в реалізації.



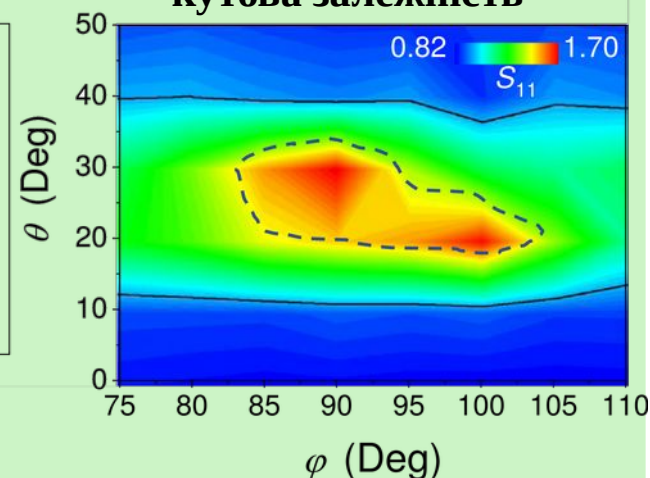
PtMn(15)/Co₇₀Fe₃₀(2.3)/Ru(0.85)/
Co₄₀Fe₄₀B₂₀(2.4)/MgO(0.8)/
Co₂₀Fe₆₀B₂₀(1.65); переріз 130 нм
× 60 нм.

Коефіцієнт підсилення

vs вхідна потужність



кутова залежність



Підсилення спостерігається в області **компенсованого нелінійного зсуву частоти** та **максимальної першої гармоніки коливань магнітоопору**.

$$Z(f) = \underbrace{(R_{dc}(f) - R_{dc}(0))}_{\text{зміна dc опору}} + \underbrace{\frac{I_{dc} R_m e^{i(\phi_R - \phi_I)}}{I_m}}_{\substack{\text{часткова} \\ \text{синхронізація}}}$$

Продемонстровано спінтронний підсилювач на основі магнітного тунельного контакту (МТК), виготовлений з КМОН-сумісних матеріалів з рекордним (на момент публікації) коефіцієнтом підсилення. Механізм підсилення – часткова синхронізація СНО зовнішнім сигналом.

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ СИСТЕМИ

1) Гетеросистеми ферит-парамагнетик:

- неоднорідне уширення ФМР**
- динамічний зв'язок ФМ-ПМ та затухання біжучих СХ**

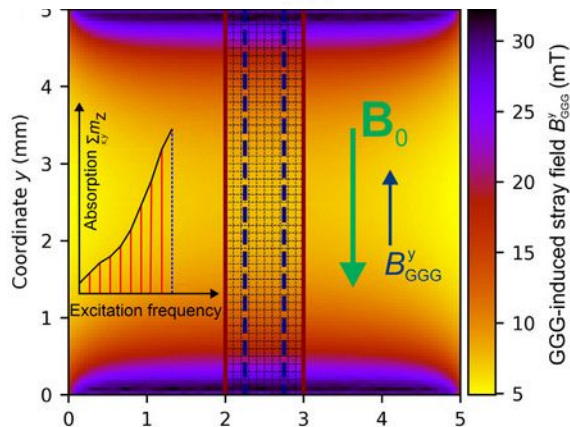
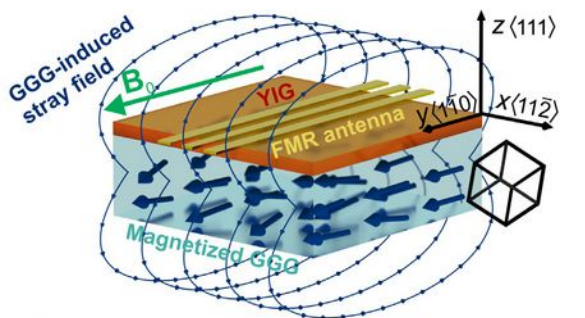
2) Гетеросистеми феромагнетик-надпровідник:

- керована локалізація СХ мод**
- Т-керований магнонний кристал**
- стабілізація магнітних скирміонів**

Гібридні квантові технології – потреба тривалого часу життя магніонів при наднизьких температурах. Рекордно низька магнітна дисипація – ЗІГ на ГГГ.

Зразок: ЗІГ(97 нм)/ГГГ(500 мкм), 5x5 мм

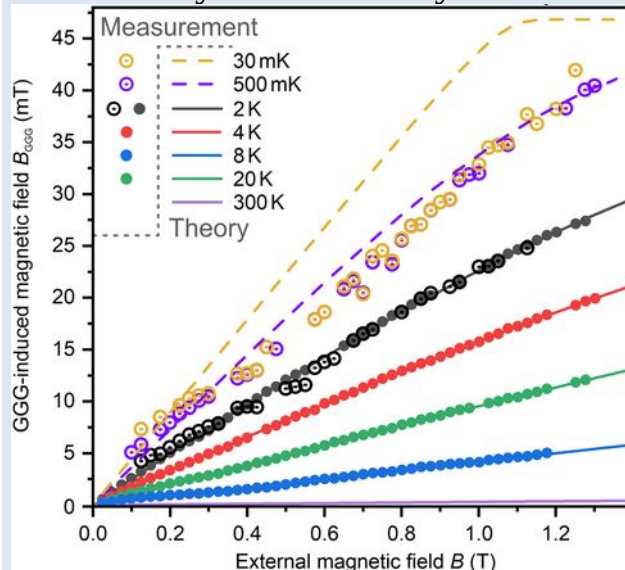
Дипольні поля ГГГ у ЗІГ



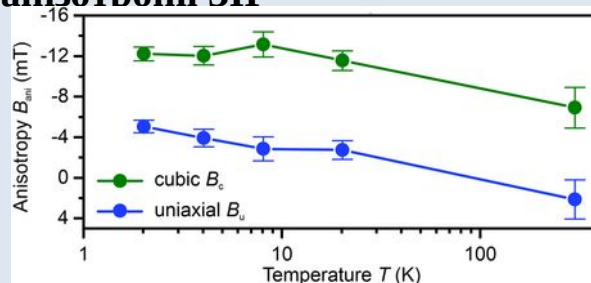
[npj Spintronics 2, 29 (2024);

Mater. Quant. Today 5, 100025 (2025)]

Поля розсіяння ГГГ,
які зсувають частоту ФМР

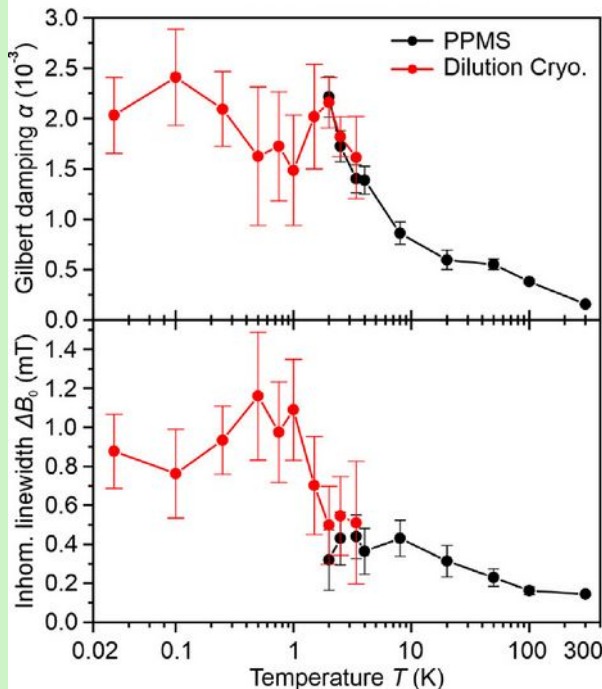
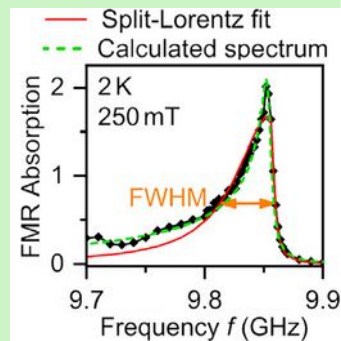


При $T < 0.5$ K поля розсіяння виходять на насичення. Свідчення фазового переходу ГГГ. Детальний аналіз дозволив виявити температурну залежність одновісної та кубічної анізотропії ЗІГ



Крива ФМР:
істотне
неоднорідне
уширення

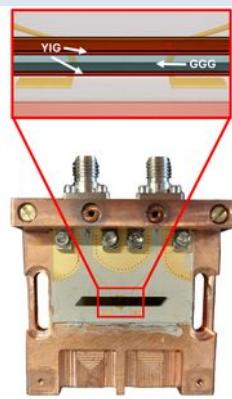
Ефф. стала
Гільберта та
неоднорідне
уширення vs T



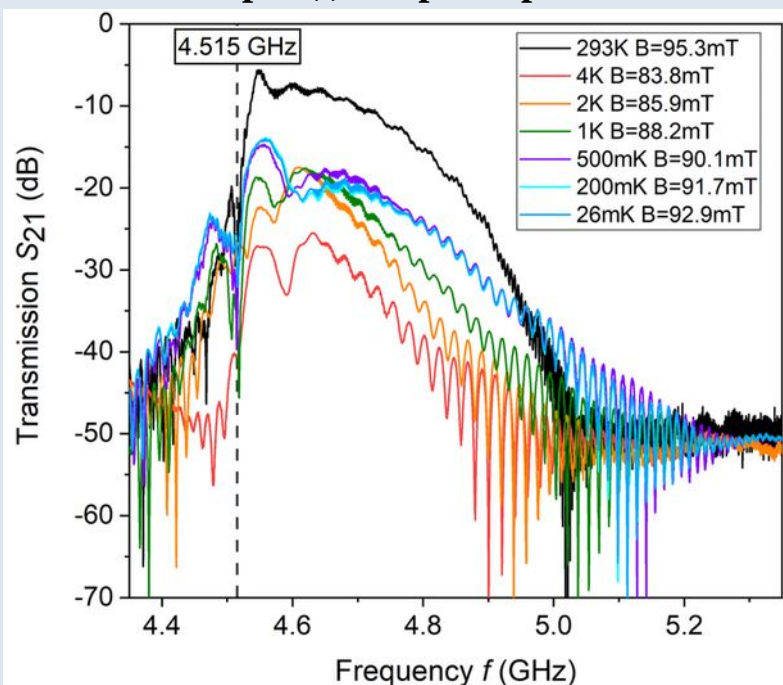
Виявлено зменшення
неоднорідного уширення при $T < 0.5$ K та α_G при $T < 0.1$ K

Зразок:

ЗІГ (7.78 мкм) / ГГГ (500 мкм)

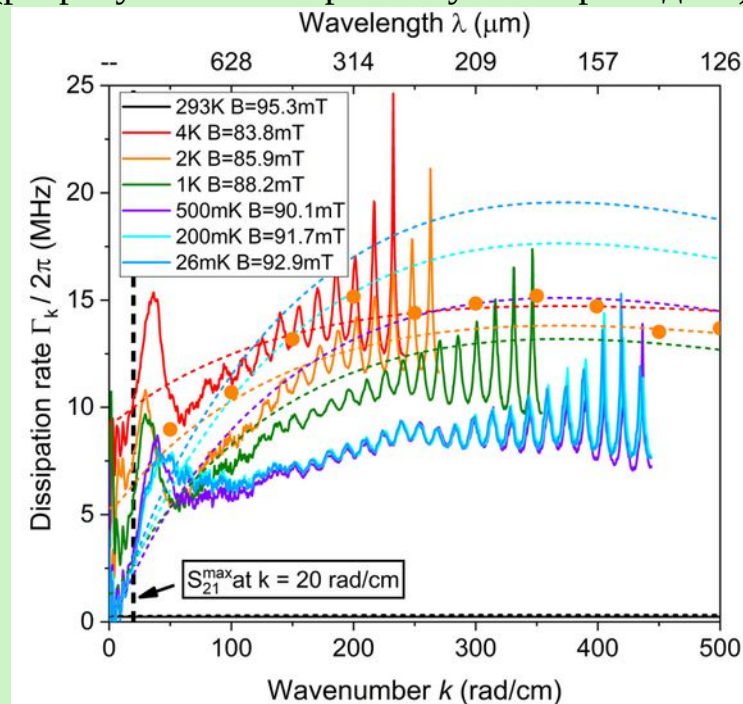


Прохідні характеристики



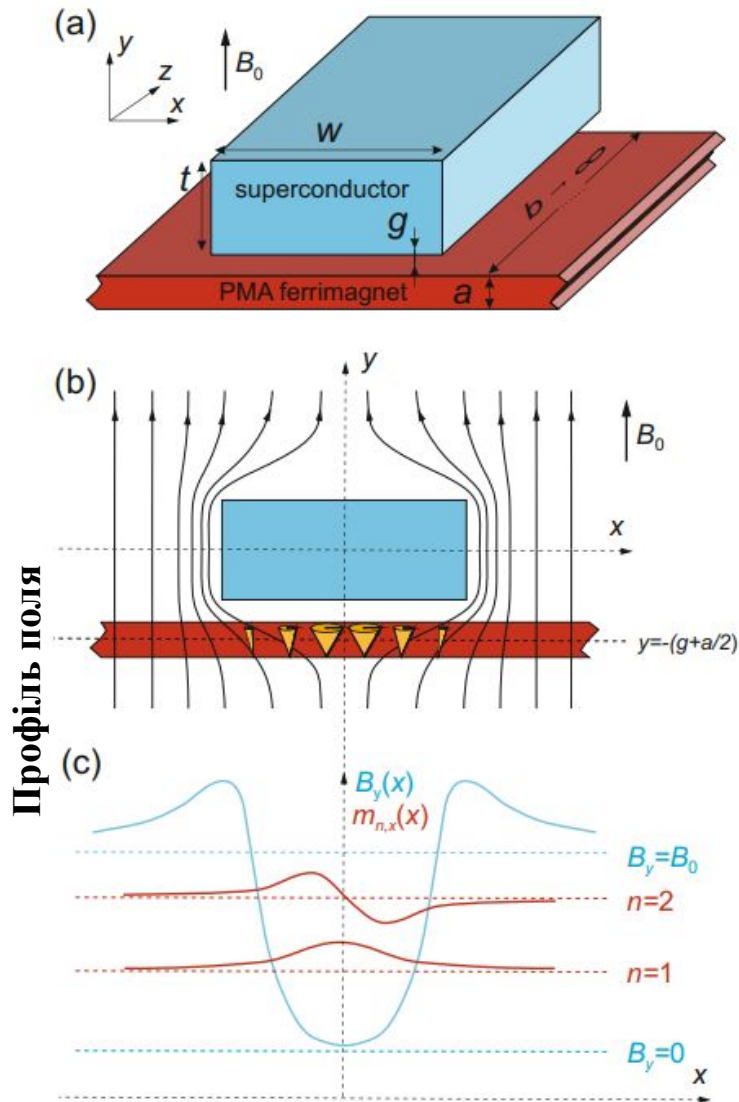
(експеримент - D. Schmol, Uni. Vienna)

Стала затухання vs хвильове число
(розрахунок з експерименту та теор. модель)



Встановлено **істотну залежність швидкості дисипації від хвильового числа магнів при кріогенних температурах**. Пояснення – **дипольний зв'язок з частково намагніченою підкладкою парамагнетика ГГГ**. Вплив є максимальним при температурі біля 1 К, а при нижчих температурах внесені втрати зменшуються внаслідок переходу ГГГ в антиферомагнітну фазу.

→ **шляхи до зниження втрат: використання обмінних магнів і температур менших за 1 К.**

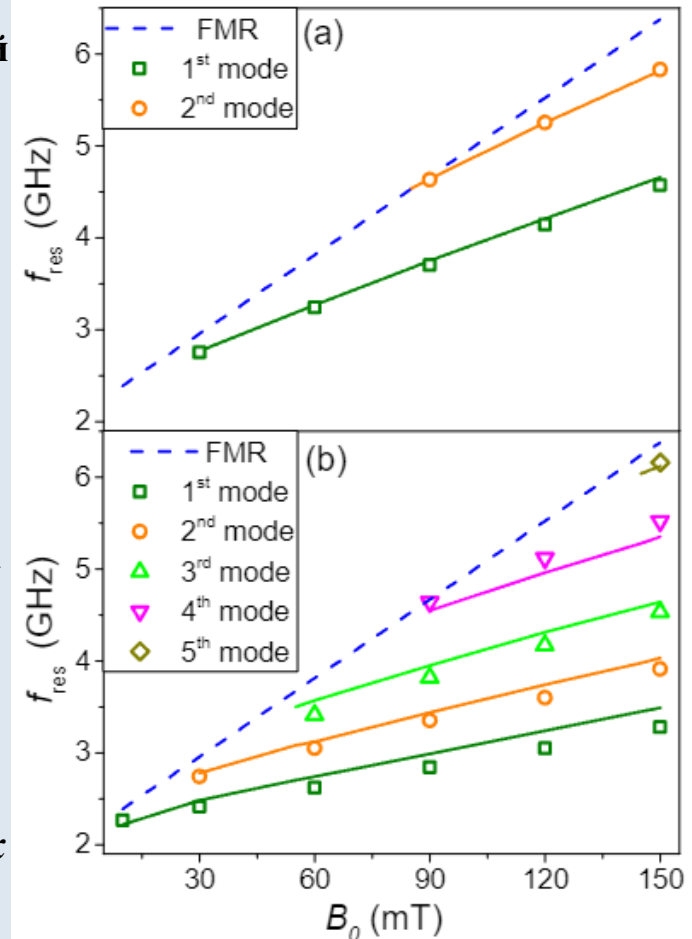


Механізм: надпровідникова (НП) смужка у перпендикулярному магнітному полі створює яму магнітного поля у ФМ плівці за рахунок ефекту Мейснера, що дозволяє отримати дискретні рівні спінових хвиль з частотою, нижче ФМР.

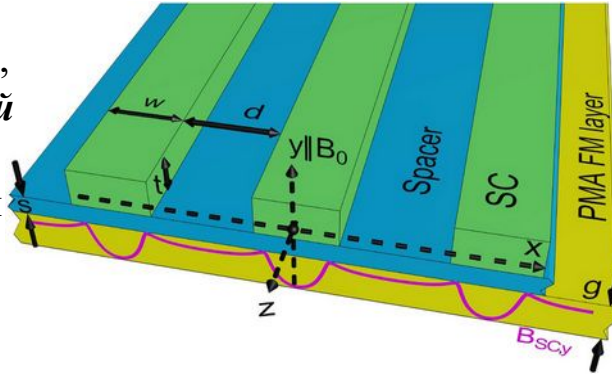
Порівняння симуляцій і теоретичних розрахунків:

Залежність частоти локалізованих мод від зовнішнього поля систем з шириною смужки 400 нм (a) та 800 нм (b).

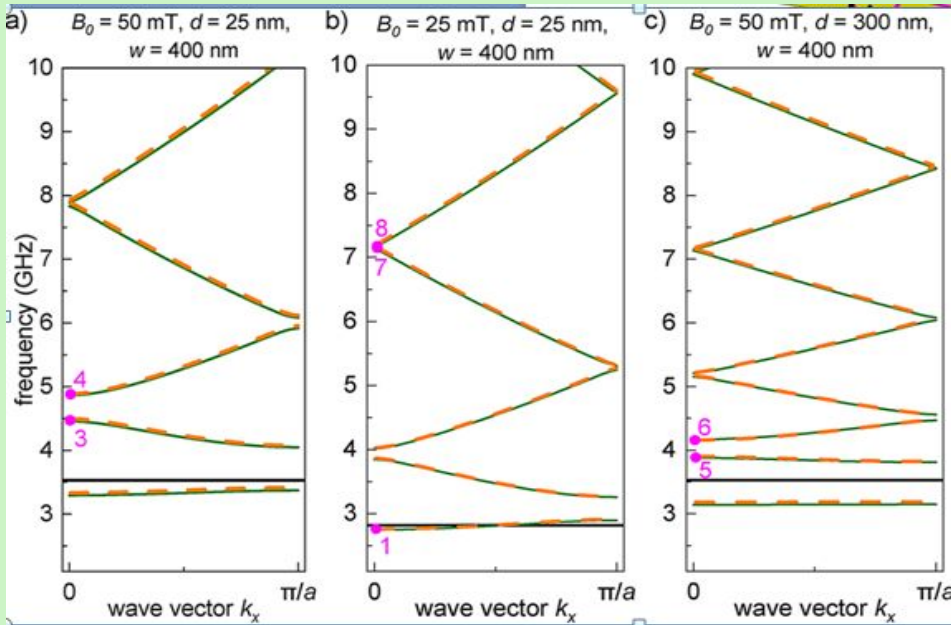
Варіація зовнішнього магнітного поля змінює глибину ями поля розсіювання, що дозволяє керувати кількістю на частоту локалізованих спінових хвиль.



Масштабуючи попередній ефект на масив НП смужок, можна отримати **магнонний кристал**, в якому періодичність створюється **неоднорідним розподілом полів розсіювання від НП смужок**.

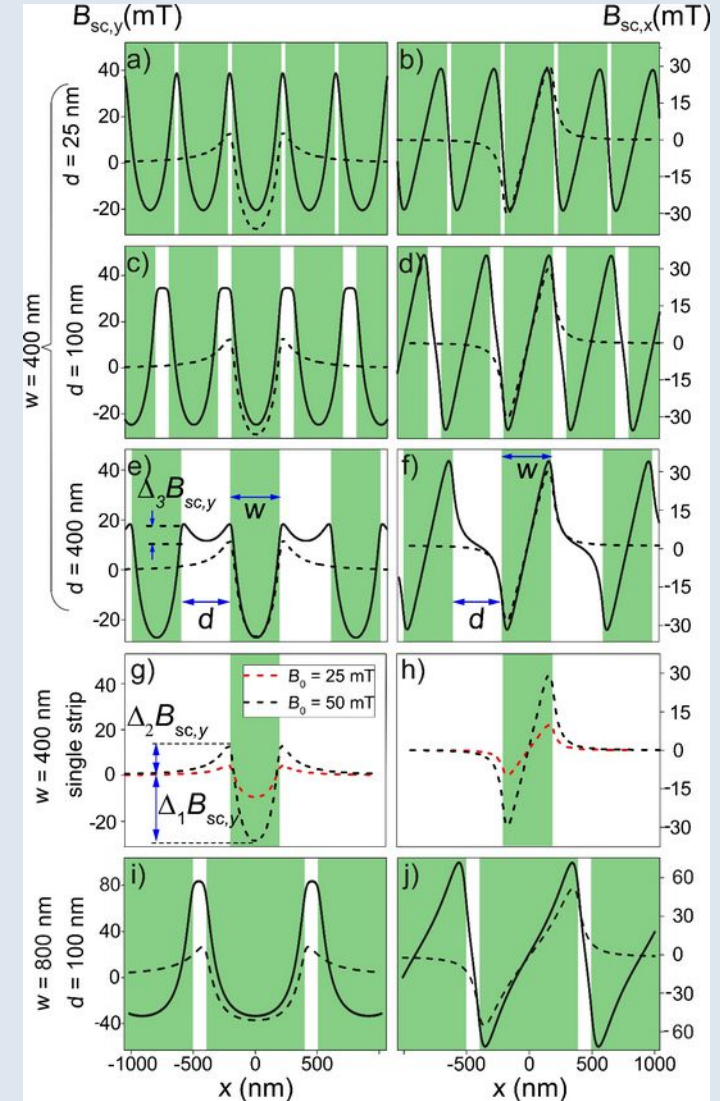


Дисперсійні співвідношення

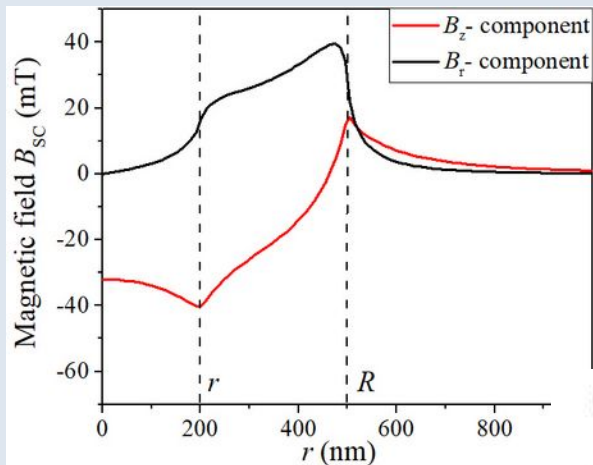
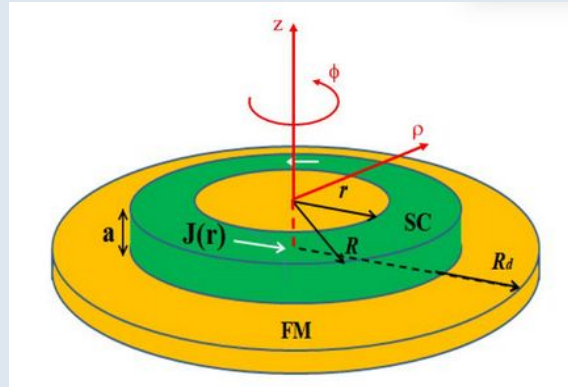


Два ступені вільності для керування дисперсійним співвідношенням СХ: **однорідне зовнішнє магнітне поле та температура (перехід однорідна плівка – магнонний кристал)**

Поля розсіювання

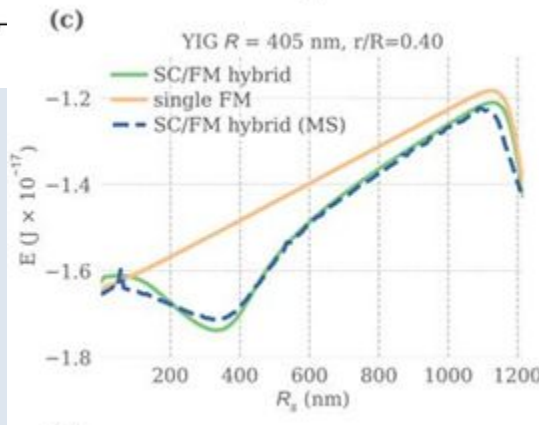


Механізм: струм в НП кільці створює поле розсіювання, яке здатне стабілізувати скіrmіон Невлівського типу в ФМ матеріалі без взаємодії Дзялошинського-Морія

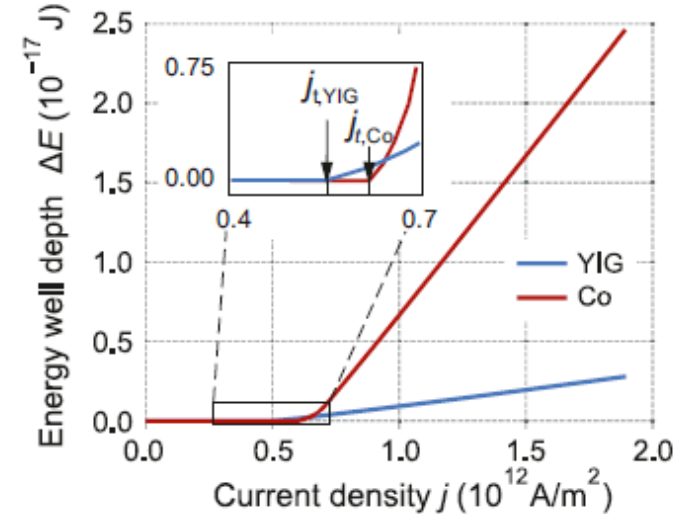


Тангенціальна компонента поля намагається вкласти намагніченість в площину плівки під кільцем, а нормальна – перпендикулярно до площини біля країв кільця

Поле від НМ кільця створює мінімум в магнітній енергії як функції радіуса скіrmіона, що означає його стабілізацію і визначає радіус.



Залежність глибини енергетичної ями від густини струму в НП кільці



Існує порогове значення густини струму, коли поля розсіювання НП кільця достатньо велике, щоб створити енергетичну яму, а значить стабілізувати скіrmіон.

Це відкриває шлях до керування (створення на знищення) скіrmіону за допомогою струму в кільці.

[Phys. Rev. B **112**, 224418, (2025)]

Виявлено та/або пояснено нові ефекти:

- ефект злиття СХ мод у круглих магнітних наноточках;
- ізотропне підвищення частоти ФМР у гетеросистемах ФМ/АФМ;
- поява гігантської двовісної анізотропії у плівках NiMnGa при магнітоструктурному переході;
- зміна нелінійного затухання у системі ФМ/САФ при зміні стану САФ;
- одночасна багатомодова генерація у спінтронному наноосциляторі.

Запропоновані методи:

- керування три- та чотиримагнетними процесами у магнітних наноструктурах за рахунок збурень, що знижують симетрію магнітного стану;
- зменшення омичних втрат у спінтронних гетеросистемах ферит-важкий метал;
- стабілізації магнітних скіrmіонів у структурах ФМ-надпровідник.

Запропоновані пристрої:

- нанорозмірний магнетний транзистор;
- нелінійний спінтронний підсилювач;
- керований температурою та полем магнетний кристал (ФМ-надпровідник).

Детально вивчено:

- розщеплення мод у неідеальних багатошарових нанoeлементах;
- гібридизацію мод у нано-САФ внаслідок конкуренції дипольної та обмінної взаємодії;
- затухання ФМР та біжучих СХ у гетеросистемах ЗІГ-ГГГ при криогенних температурах.

1 монографія, 1 розділ у колективній монографії,

21 стаття = 19 в закордонних виданнях, 2 в українських, в т.ч. 17 статей у виданнях, що належать до кuartилів Q1 та Q2

Кількість цитувань: 139 (Web of Science) / 170 (Scopus) / 264 (Google Scholar)

h-індекс (за роботою): 8 (Web of Science) / 8 (Scopus) / 11 (Google Scholar)



scientific reports

Tunable magnonic crystal in a hybrid superconductor-ferrimagnet nanostructure

Julia Kharlan^{1,2}, Krzysztof Szulc^{1,3}, Jarosław W. Klos¹ & Grzegorz Czentala^{1,2}

Chapter 5
Controlling Multimagnon Interaction in Magnetic Nanodots and Spintronic Nanostructures

Roman Verba¹, Julia Kharlan¹, Vladyslav Borynskyi¹, Denys Slobodianiuk¹, Arezoo Etesamirad¹, and Igor Barsukov¹



Applied Physics Letters

ARTICLE

Nanoscaled magnon transistor based on stimulated three-magnon splitting

Xu Ge¹, Roman Verba², Philipp Pirro², Andrii V. Chumak¹ and Qi Wang¹

SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

Simultaneous multitone microwave emission by dc-driven spintronic nano-element

Alexandre Abbass Hamadeh^{1*}, Denys Slobodianiuk^{2,3}, Rayan Moukhaider⁴, Gennadiy Melkov², Vladyslav Borynskyi³, Morteza Mohseni¹, Giovanni Finocchio⁴, Vitaly Lomakin³, Roman Verba³, Grégoire de Loubens⁶, Philipp Pirro¹, Olivier Klein⁷

PHYSICAL REVIEW B 105, 014407 (2022)

Merging of spin-wave modes in obliquely magnetized circular nanodots

Julia Kharlan^{1,*}, Vladyslav Borynskyi^{1,*}, Sergey A. Bunyaev², Pavlo Bondarenko¹, Olga Salyuk¹, Vladimir Golub¹, Alexander A. Serga³, Oleksandr V. Dobrovolskiy⁴, Andrii Chumak⁴, Roman Verba^{1,†} and Gleb N. Kakazei²

ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES

Research Article

Controlling Magnon Interaction by a Nanoscale Switch

Arezoo Etesamirad, Rodolfo Rodriguez, Joshua Bocanegra, Roman Verba, Jordan Katine, Ilya N. Krivorotov, Vasyly Tyberkevych, Boris Ivanov, and Igor Barsukov

PHYSICAL REVIEW APPLIED 19, 044087 (2023)

Controlling Selection Rules for Magnon Scattering in Nanomagnets by Spatial Symmetry Breaking

Arezoo Etesamirad^{1,†}, Julia Kharlan^{2,3,†}, Rodolfo Rodriguez¹, Igor Barsukov^{1,*} and Roman Verba^{2,†}