

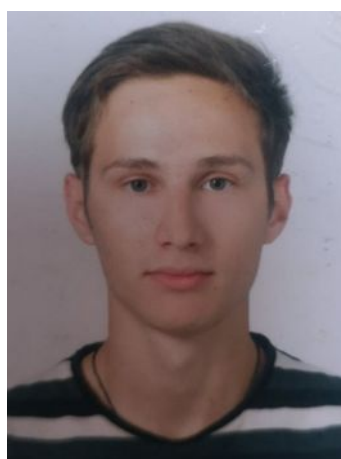


Інститут магнетизму ім. В. Г. Бар'яхтара НАН України

Грант дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених
НАН України 2024-2025 рр. № 08/01-2024(5)

КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ПРОЦЕСАМИ У СПІНТРОННИХ НАНОСТРУКТУРАХ

Керівник — д. ф.-м. н., с. д. Роман ВЕРБА



Керівник:
Роман Верба,
д. ф.-м. н, с. д.,
заст. дир. з
наук. роботи

Владислав
Боринский,
д. філос.,
н. с.

Павло
Полинчук,
д. філос.,
м. н. с.

Юлія Харлан,
д. філос.,
м. н. с.
(участь у
2025р.)

Роман Тесля,
аспірант II к.
(участь у
2025р.)

Владіслав
Заморський,
д. філос., н. с.
(участь у
2024 р.)

Усі виконавці – Інститут магнетизму ім В.Г. Бар'яхтара НАН України

Мета – детальне вивчення шляхів керування нелінійними 3- та 4-магнетонними процесами в однота багат шарових магнетних наноструктурах та розробка способів використання досліджених закономірностей для розширення функціональних можливостей нанoeлементів спінтроніки.

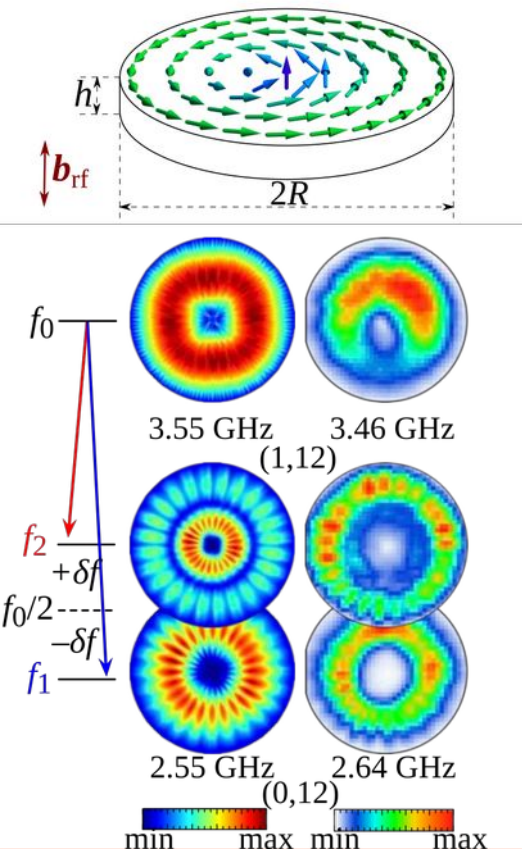
Задачі проекту

А. Встановлення загальних закономірностей:

- 1) зміни інтенсивності та правил відбору тримагнетонних процесів у магнетних нанoeлементах у насиченому стані при малих змінах статичного стану від рівноважного;
- 2) впливу міжмодової гібридизації у двошарових спінтронних наноструктурах на чотиримагнетонні процеси;
- 3) тримагнетонного розсіяння біжучих спінових хвиль на локалізованих модах.

Б. Застосування:

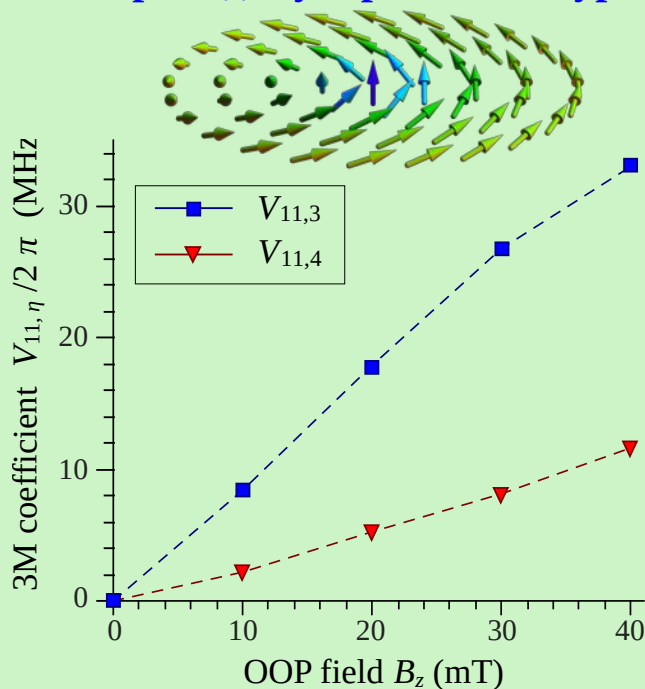
- 4) вивчення впливу зміни інтенсивності чотиримагнетонних процесів на динаміку спінтронних наноосциляторів та можливості керування осциляторами;
- 5) застосування тримагнетонних процесів для підсилення, детектування чи/та інших функціональних операцій для потреб магнетоніки.



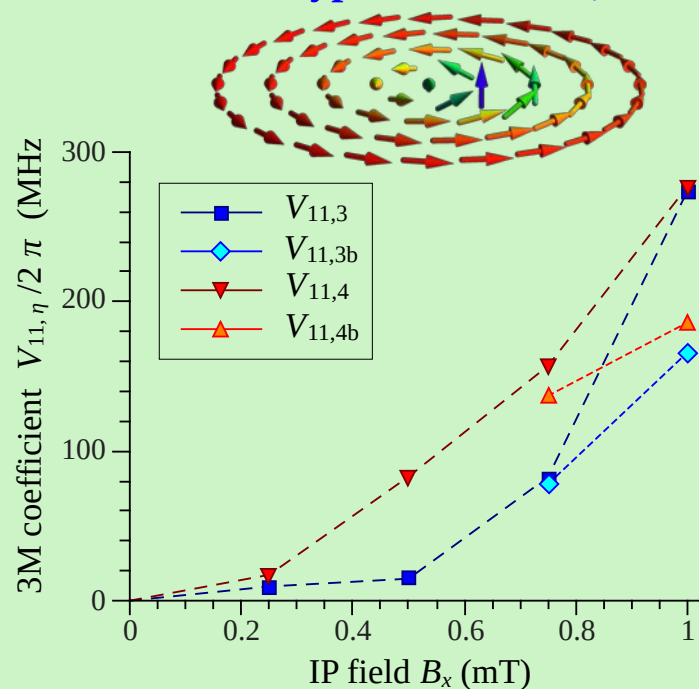
Відомо, що тільки **невироджені процеси** дозволені у незбуреному вихорі

Розглянуті процеси: $(1,0) + (1,0) \rightarrow (3,0)$ та $(1,0) + (1,0) \rightarrow (4,0)$
В ідеальному вихорі – заборонені. Відповідають за нелінійне затухання та 2ω .

Перпендикулярне поле збурення

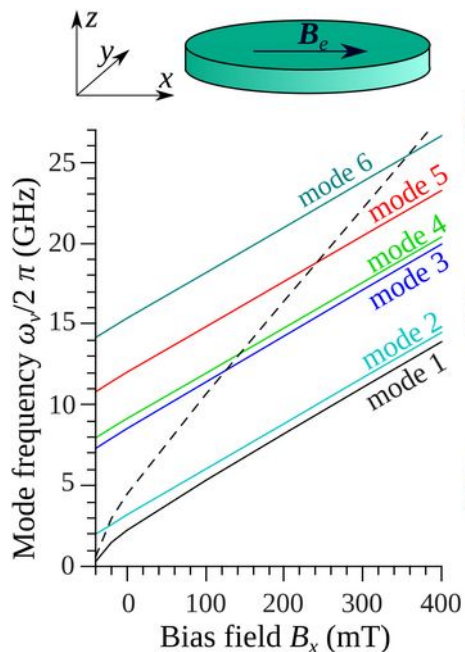


Поле збурення в площині

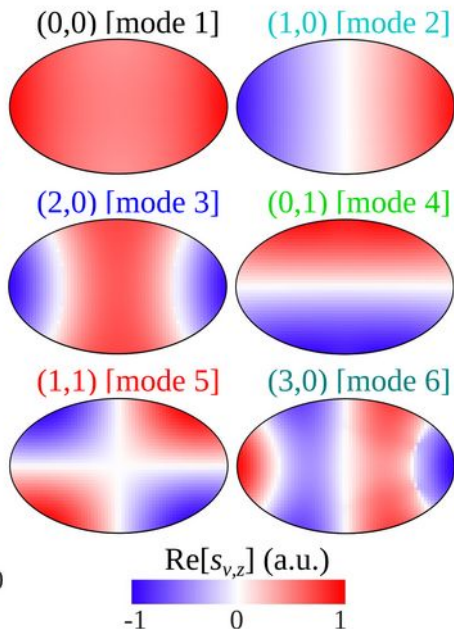


Встановлено, що **збурення вихрового стану скасовують заборону на невироджені тримагнотні процеси**. Збурення у площині (зсув ядра вихору) є набагато **більш ефективним методом** впливу на тримагнотні процеси.

Спектр СХ мод



Профілі мод



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	-	+	-	+

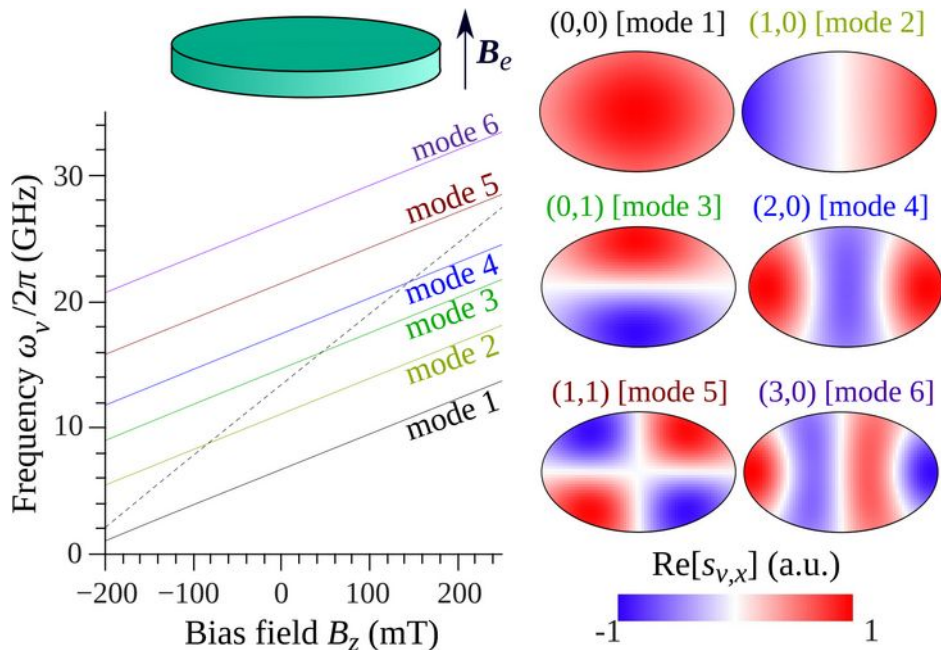
У незбуреному стані моди строго симетричні (C) або антисиметричні (A) відносно осей наноточки.

Правила відбору тримагنونних процесів: $\sum \nu n_{\nu,x}$ та $\sum \nu n_{\nu,y}$ – непарні.

Систематизовано вплив збурень **всіх можливих симетрій** на вироджений тримагنونний процес. Більшість збурень мають **селективний вплив**.

Спектр СХ мод

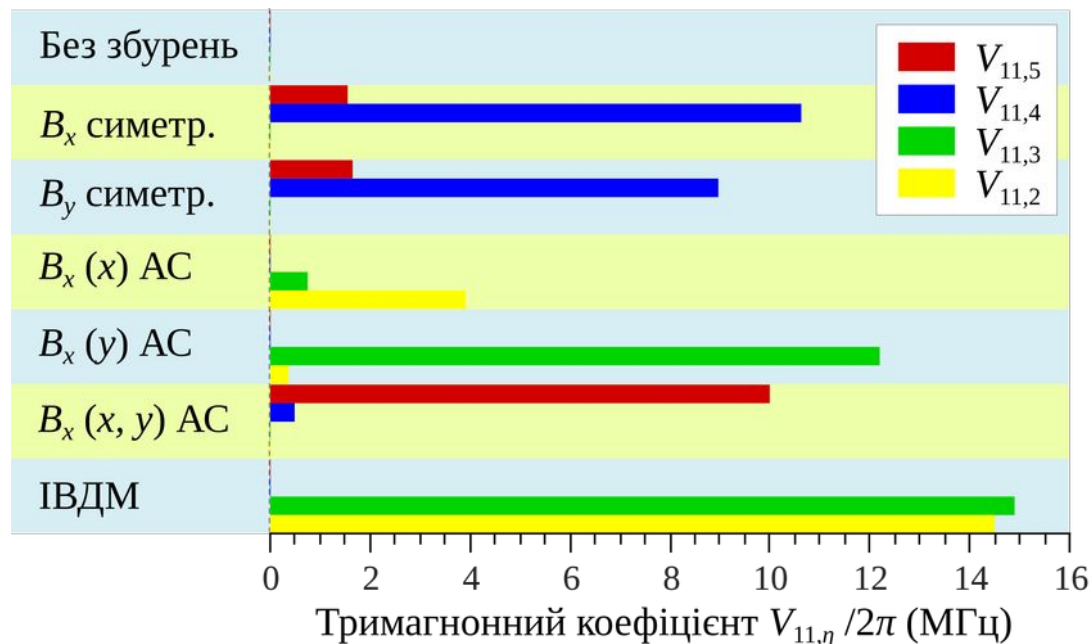
Профілі мод



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

Однак **тримагнонні процеси заборонені взагалі.**

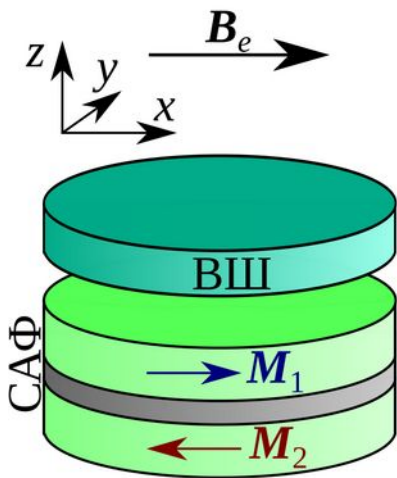
Вплив збурень на процес $(1+1) \rightarrow \nu$



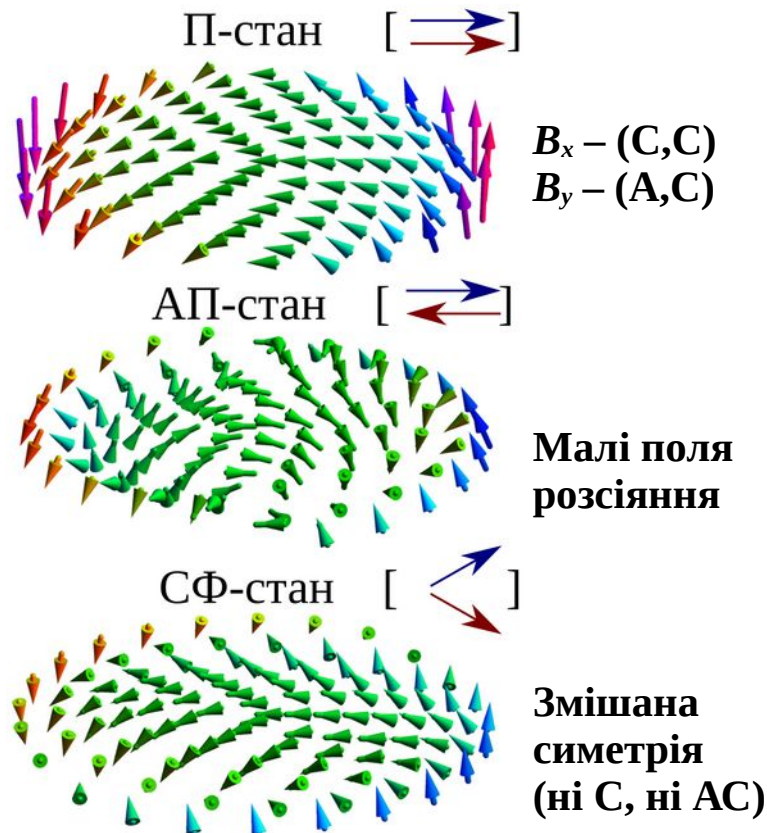
Величина збурень 10 мТл, стала ІВДМ $Db/h = 0.05$ мДж/м².

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

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 тримагнними процесами у ВШ**

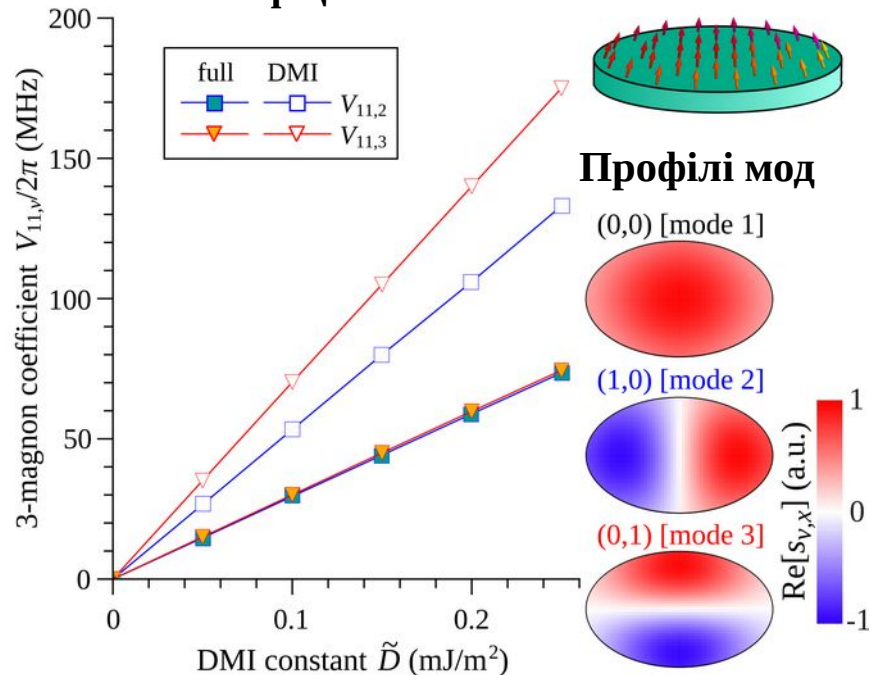
Інші можливі альтернативи: перехід вихор - насичений стан, одно-/багатодоменний стан, тощо.

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

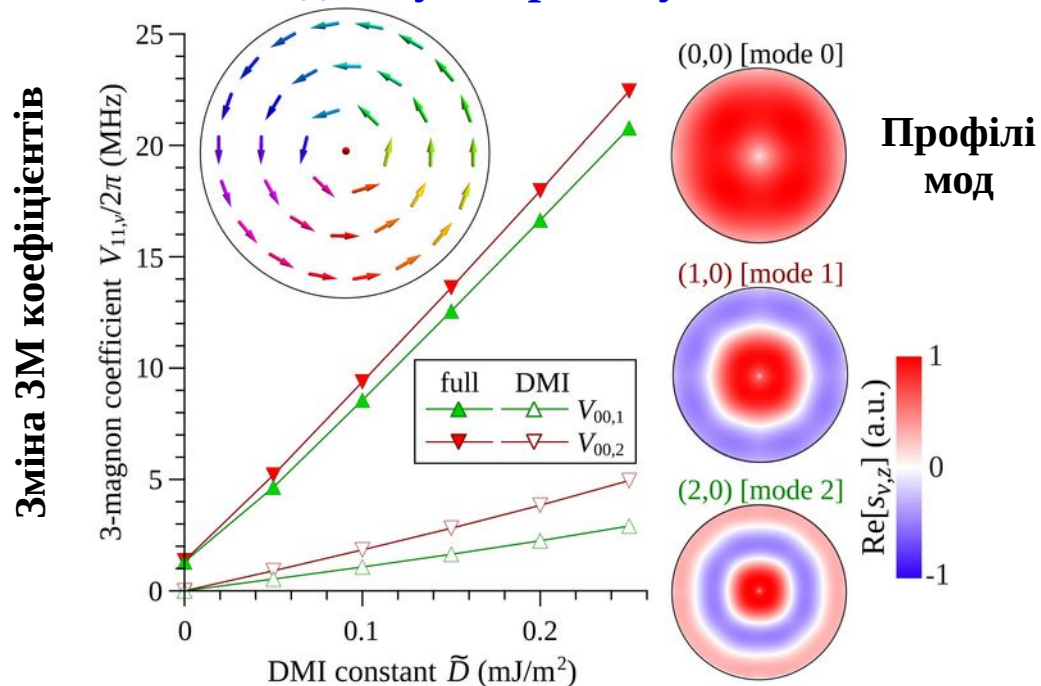
$$W_{\text{IDMI}} = (\tilde{D}/M_s^2) [M_z \nabla \cdot \mathbf{M} - \mathbf{M} \cdot (\nabla M_z)]$$

Перпендикулярно намагнічена наноточка

Зміна 3М коефіцієнтів



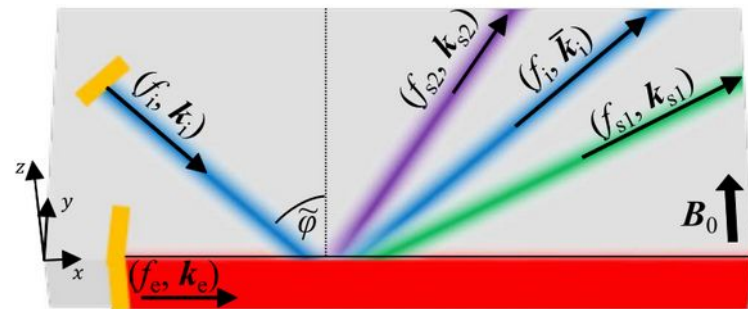
Магнітний диск у вихровому стані



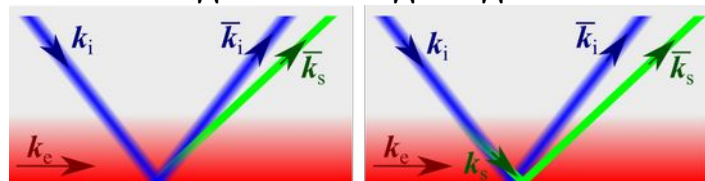
ІВДМ чинить **сильний ефект** на тримагنونні процеси = Σ прямого внеску + непрямого через зміну статичного стану.
 ІВДМ присутня у більшості спінтронних структур → **можливі ускладнення в інтерпретації результатів та керуванні**.
 Електрично керована ІВДМ → **новий шлях керування**

3-МАГНОННЕ РОЗСІЯННЯ СПІНОВОЇ ХВИЛІ НА КРАЙОВІЙ МОДІ 9

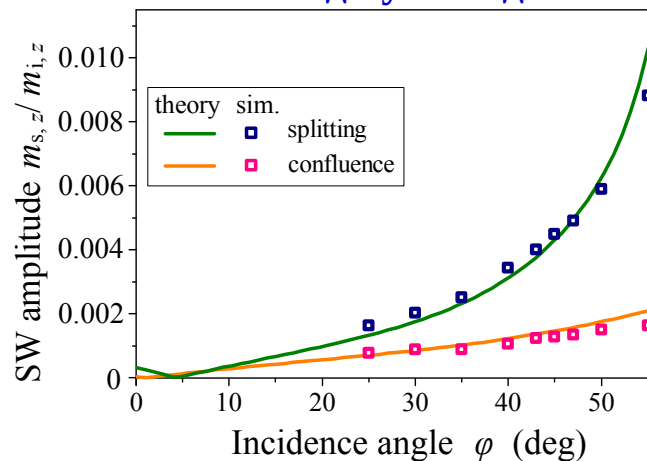
Схема розсіювання хвиль



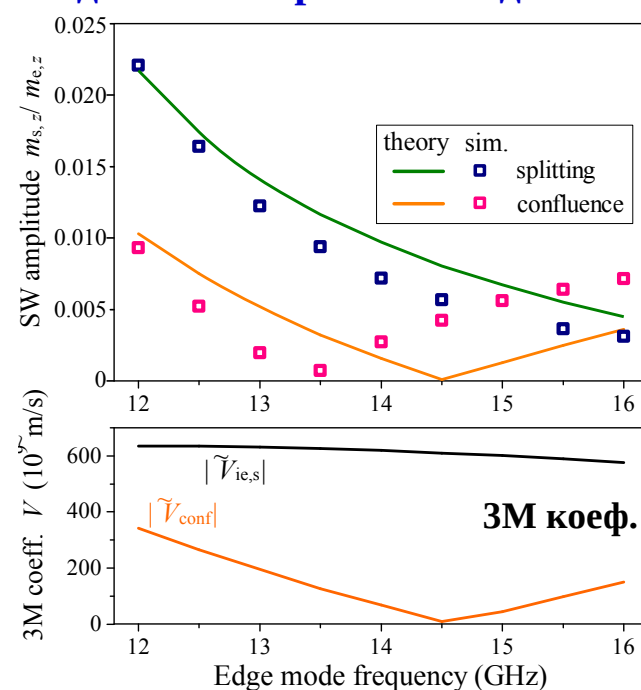
2 парціальні процеси: розсіювання після відбиття і до відбиття



Залежність від кута падіння



від частоти крайової моди



Ефективний тримагнотний коефіцієнт

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

ϕ_α – набіг фази при відбитті

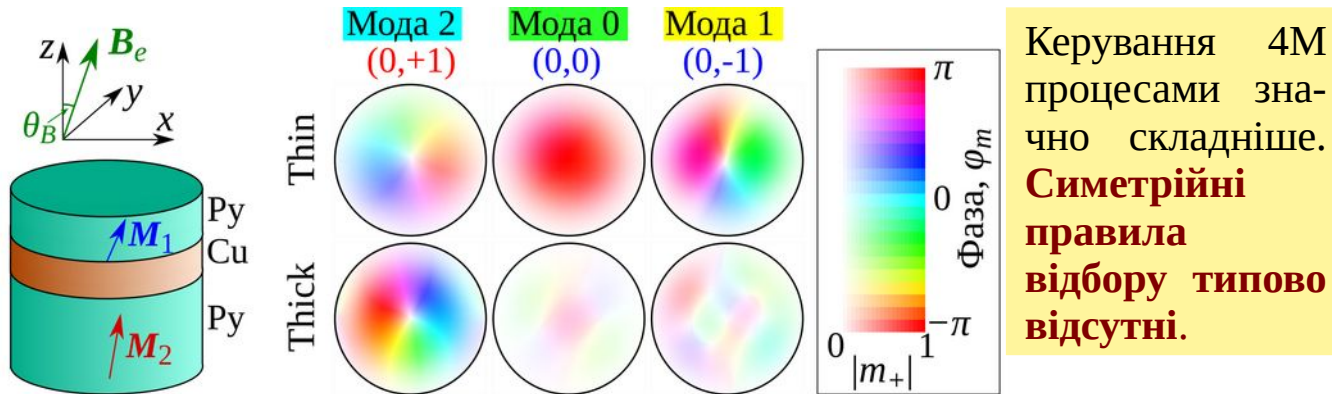
Амплітуда розсіяної хвилі

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

Загальний тренд ефективності 3М розсіювання $V \sim \sin[2\phi]$.

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**



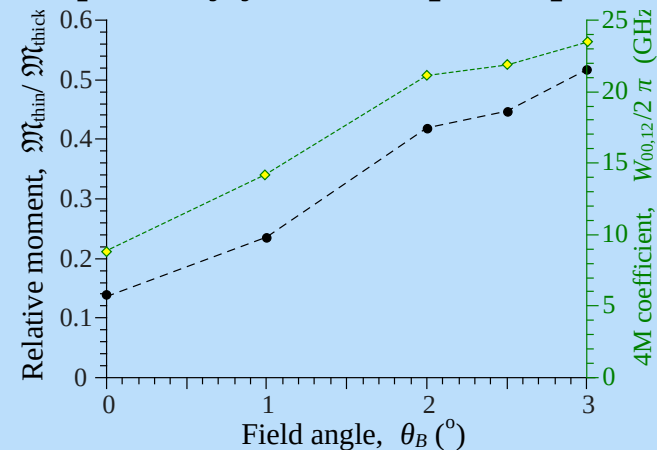
Керування 4М процесами значно складніше. **Симетричні правила відбору типово відсутні.**

Можливий процес – сулівська нестійкість 2-го порядку

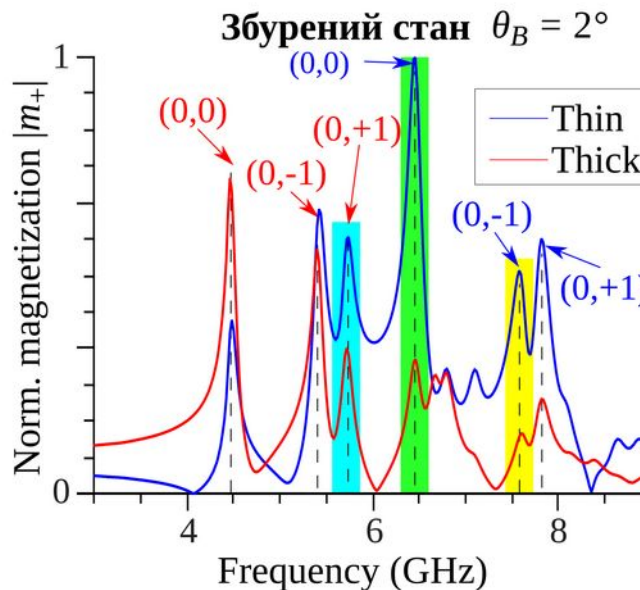
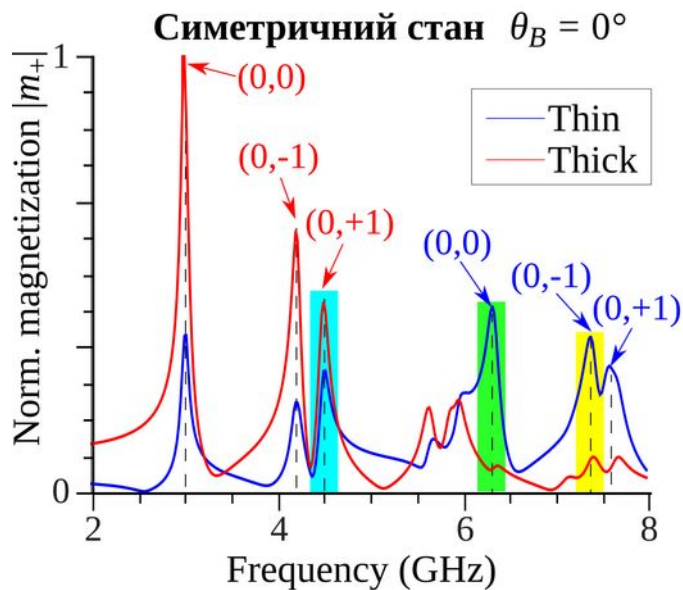
$$0 + 0 \rightarrow 1 + 2$$

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

Наслідок: зміна 4-магнонного коефіцієнту у понад 2 рази при 3°.



Гібридація мод – альтернатива для керування 4М процесами.



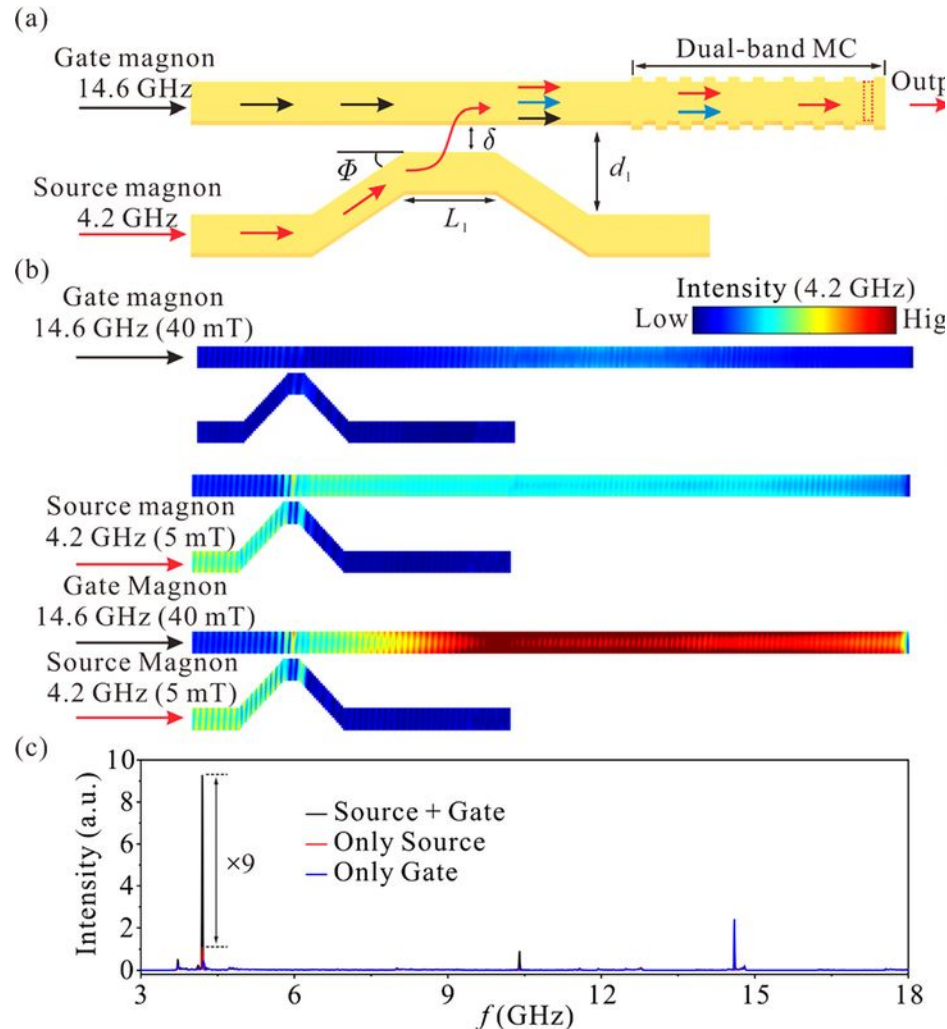
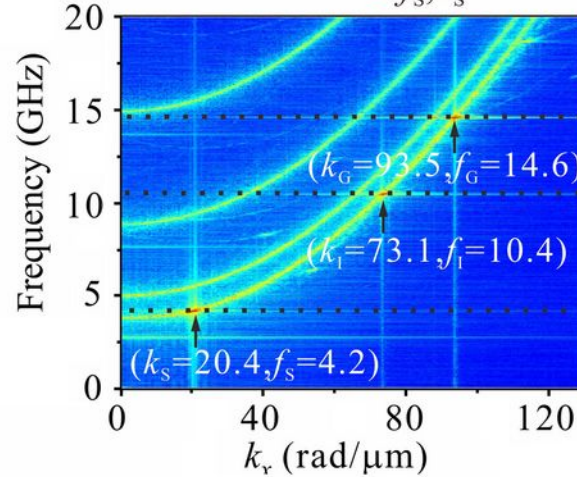
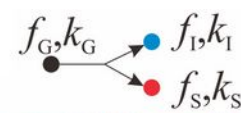


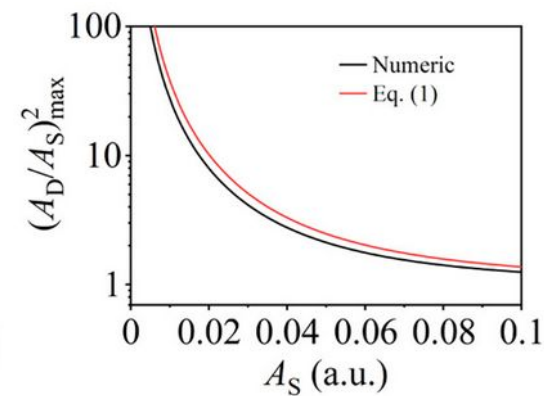
Схема 3М процесу



Ефективність 3М процесу

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

Коефіцієнт підсилення



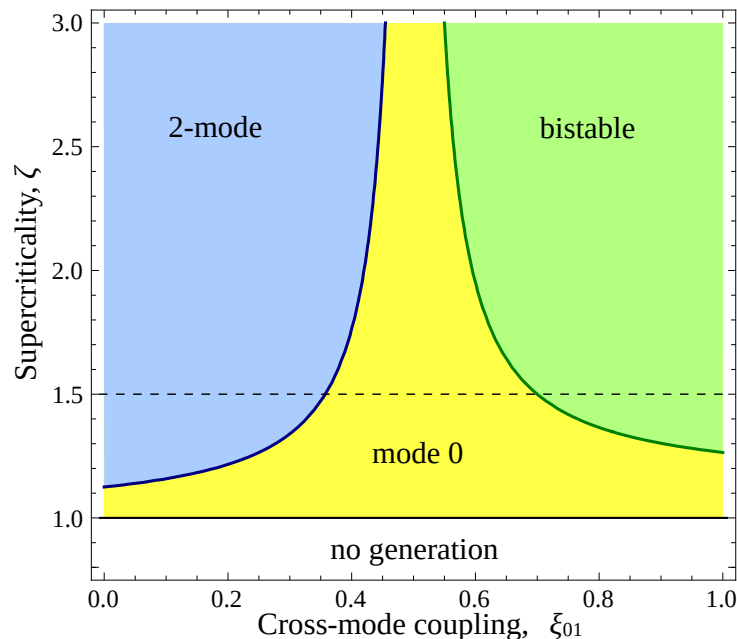
Числовими методами продемонстровано роботу **магнонного транзистора** на основі стимульованого тримагнонного розщеплення. Для змішування сигналу та накачки використовується магнонний відгалужувач, а для фільтрації холостих магنونів та накачки на стоці транзистора – двосмуговий магнонний кристал. Досягнуто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

Модель двомодового осцилятора

$$\dot{a}_j + i\tilde{\omega}_j a_j + \tilde{\Gamma}_j a_j = \Lambda_j e^{-i\omega_e t}, \quad j \neq k = 1, 2$$

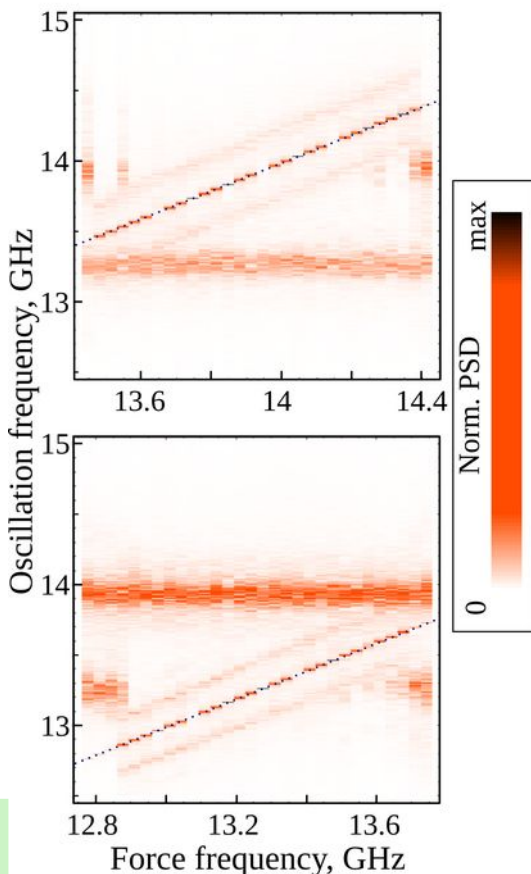
$$\tilde{\Gamma}_j = \Gamma_j (1 + \xi |a_j|^2 + \xi_{01} |a_k|^2) - \sigma I (1 - \xi |a_j|^2 + \xi_{01} |a_k|^2)$$

Діаграма станів генерації

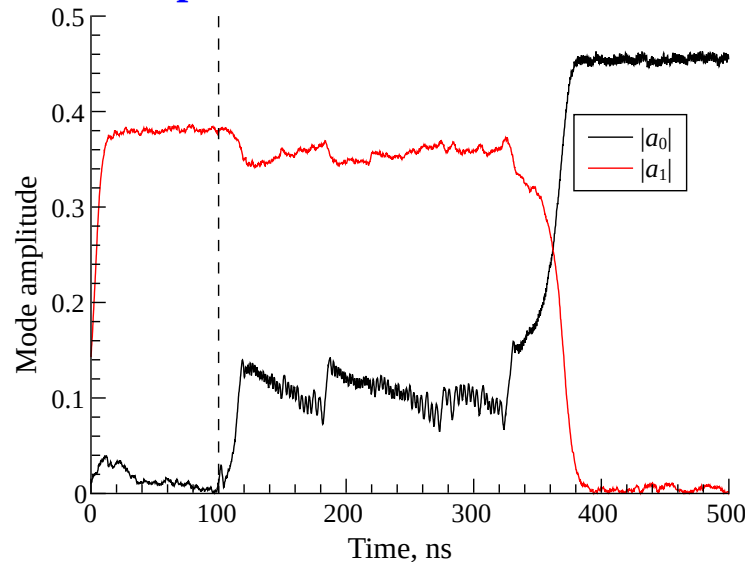


Змінюючи міжмодову взаємодію можна реалізувати **різні режими генерації**

Синхронізація у двомодовому режимі



Перемикання генерації у бістабільному режимі НВЧ сигналом



Двомодовий режим — можлива **синхронізація кожної з мод.**

Бістабільний режим — **динамічне перемикання режиму генерації** (моди і, відповідно, частоти) імпульсом синхронізації.

- продемонстровано можливість ефективного керування інтенсивністю та правилами відбору тримагнетонних процесів розсіяння за допомогою керованого порушення симетрії магнітного стану; для наноточок у насиченому стані встановлено відповідність симетрії мод, які беруть участь у тримагнетонному процесі, до симетрії керівного збурення;
- розвинена теорія тримагнетонного розсіяння об'ємних спінових хвиль на крайових модах, встановлена чутливість цього процесу до умов на границі, що відкриває шлях керування ним;
- продемонстровано функціональність підсилювача спінових хвиль на основі вимушеного тримагнетонного розсіяння;
- встановлено, що гібридизація мод у багатошарових наноструктурах може бути ефективним механізмом керування чотиримагнетонними процесами і, відповідно, параметричною нестійкістю другого порядку;
- встановлено вплив нелінійної міжмодової взаємодії на динаміку спітронних осциляторів, сформульовані умови реалізації одно-, двомодового та бістабільного режимів генерації, а також динамічного перемикування генерації.

Розділи у колективних монографіях:

1. **R. Verba, J. Kharlan, V. Borynskyi**, D. Slobodianiuk, A. Etesamirad, I. Barsukov, Controlling multimagnon interaction in magnetic nanodots and spintronic nanostructures // In: I. Vladymyrskyi, et al. (eds.) *Functional Magnetic and Spintronic Nanomaterials. NATO SPS Series B* (Springer, Dordrecht, 2024), P. 89-132.

Статті у періодичних наукових виданнях:

1. X. Ge, **R. Verba**, P. Pirro, A. V. Chumak, Q. Wang, Nanoscaled magnon transistor based on stimulated three-magnon splitting, [Appl. Phys. Lett.](#) **124**, 122413 (2024).
2. K. Davidková, K. Levchenko, F. Bruckner, **R. Verba**, F. Majcen, Q. Wang, M. Lindner, C. Dubs, V. Vlaminck, J. Klíma, M. Urbánek, D. Suess, and A. Chumak, Nanoscale spin-wave frequency-selective limiter for 5G technology, [Phys. Rev Appl.](#) **23**, 034026 (2025).
3. **V. Borynskyi, J. Kharlan, and R. Verba**, Effect of interfacial Dzyaloshinskii–Moriya interaction on three-magnon processes in thin magnetic nanodots, [Фіз. низьк. темп.](#) **51**, 1094 (2025).
4. D. Slobodianiuk, A. Slavin, V. Tyberkevych, and **R. Verba**, Auto-oscillations and phase-locking in a multimode spin-torque oscillator, [Фіз. низьк. темп.](#) **51**, 891 (2025).
5. **J. Kharlan, R. Verba**, K. Sobucki, P. Gruszecki, M. Krawczyk, Three-magnon scattering of spin wave on edge-localized mode in thin ferromagnetic film, [Phys. Rev. B](#) **112**, 214438 (2025).

Дисертації, захищені авторами НДР:

1. **Полинчук П. Ю.** Безрелаксаційне перемикування комірок магнітної пам'яті на основі багатошарових наносистем з антиферромагнітним зв'язком: дис. ... д. філос.: 104 - Фізика та астрономія, Ін-т магнетизму НАН України та МОН України. – Київ, 2024.

Тези та праці міжнародних конференцій:

1. K. Sobucki, **J. Kharlan**, **R. V. Verba**, et al., Nonlinear Effects in Inelastic Scattering of Spin-Wave Beams on Localized Modes for Controlling Propagation of Scattered Beams // INTERMAG 2024 (Rio de Janeiro, Brazil, 2024).
2. Yu. Dzhezherya, **P. Polynchuk**, A. Kravets and V. Korenivski, Ultrafast inertia-free switching of double magnetic tunnel junctions // «Topical problems of semiconductors physics» (Drohobych, Ukraine, May 27-31, 2024).
3. **R. Verba**, **J. Kharlan**, **V. Borynskyi**, D. Slobodianiuk, A. Etesamirad, I. Barsukov, Controlling multimagnon processes in magnetic nanostructures // «Condensed matter & low temperatures» (June 3-7, 2024, online).
4. **J. I. Kharlan**, **V. Yu. Borynskyi**, A. Etesamirad, I. Barsukov, **R. V. Verba**, Symmetry breaking as an efficient tool for controlling three-magnon scattering in nanomagnets // NANO-2024 (21–24 August 2024, Uzhgorod, Ukraine).
5. **R. Teslia**, O. Kolezhuk, I. Gerasimchuk, Current-driven dynamics of domain walls in low-dimensional helimagnets // International Workshop on Unconventional Magnetism in Quantum Materials (July 14-15, 2025, Kyiv, Ukraine).
6. A. Hamadeh, **R. Verba**, D. Slobodianiuk, **V. Borynskyi**, G. De Loubens, P. Pirro, O. Klein, Coherent magnon interactions and multitone microwave emission in spintronic nano-oscillators: bridging nonlinear dynamics and phase-locked synchronisation // Magnonics 2025 (Cala Millor, Mallorca, Spain, July 28 - August 01, 2025).
7. **P. Yu. Polynchuk**, Yu. I. Dzhezherya, A. F. Kravets, V. Korenivski, Ultrafast inertia-free switching of double magnetic tunnel junctions // NANO-2025 (August 20-23, 2025, Bukovel, Ukraine).
8. D. V. Slobodianiuk, **R. V. Verba**, Multimode generation regime in spin-torque nano-oscillator // NANO-2025.