

На здобуття
Державної премії України в галузі науки і техніки 2021 року

**ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ
СПІН-ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА СПІНТРОНІКИ**



**Робота представлена
Інститутом магнетизму НАН України та МОН України**

Автори

Інститут магнетизму НАН України та МОН України



Верба Роман Володимирович, к. ф.-м. н., старший науковий співробітник

Голуб Володимир Олегович, д. ф.-м. н., с.н.с., завідувач відділу

Товстолиткін Олександр Іванович, д. ф.-м. н., професор, завідувач відділу

Каказей Гліб Миколайович, д. ф.-м. н., нині - Університет Порту,
Португалія, провідний науковий співробітник



Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Мелков Геннадій Андрійович, д. ф.-м. н., професор,
старший науковий співробітник

Шека Денис Дмитрович, д. ф.-м. н., професор, професор

Серга Олександр Олександрович, д. ф.-м. н., приват-доцент,
нині – Технічний університет Кайзерслаутерна, Німеччина,
старший науковий співробітник



Чумак Андрій Васильович, к. ф.-м. н., професор, нині –
Університет Відня, Австрія, завідувач лабораторії



Опис роботи

Кількість публікацій: **164**, в т.ч. 1 монографія

Кількість цитувань: 8479 (Web of Science) / 8853 (Scopus) / 14485 (Google Scholar)

h-індекс (за роботою): **45** (Web of Science) / **44** (Scopus) / **52** (Google Scholar)

За тематикою захищено 9 докторських та 15 кандидатських дисертацій

Мета роботи — вивчення фундаментальних фізичних ефектів – підґрунтя для розробки новітніх мікро- та нанорозмірних пристроїв спін-хвильової електроніки та спінтроніки, розвиток фізичних принципів створення таких пристроїв, а також створення і дослідження нових магнітних матеріалів для цих потреб.

СТРУКТУРА

1. Магنونні кристали – штучні середовища спін-хвильової електроніки

2. Логічні елементи та інші компоненти спін-хвильових цифрових інформаційних систем

3. Нелінійні та параметричні процеси в спін-хвильовій електроніці

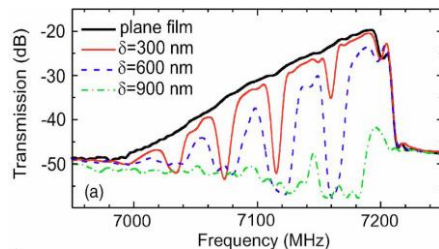
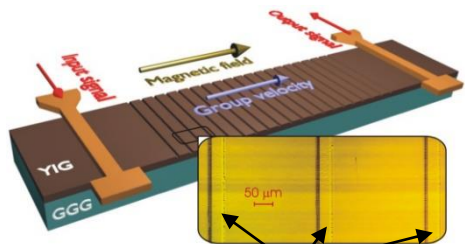
4. Магнетизм у криволінійних структурах

5. Магнітні солітони у спінтроніці та магنونіці

6. Новітні матеріали та явища спінтроніки

Штучні магنونні кристали, побудовані на основі брегівської дифракції на періодичних неоднорідностях магнетного середовища, змінюють спін-хвильовий спектр та формують заборонені зони – частотні смуги, де відсутні спін-хвильові збудження.

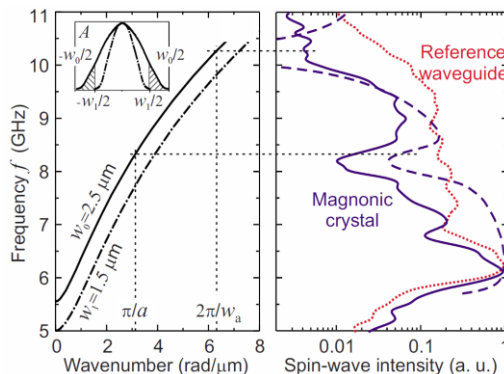
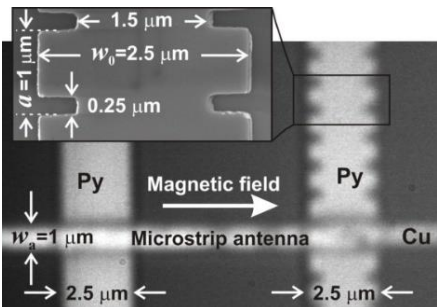
Статичний жолобковий кристал на основі феритової плівки залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ, $Y_3Fe_5O_{12}$)



Витравлені на поверхні плівки жолобки глибиною δ

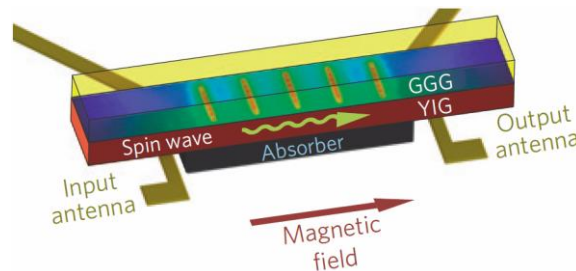
Appl. Phys. Lett. **93**, 022508 (2008)
Appl. Phys. Lett. **94**, 172511 (2009)

Мікророзмірний ширинно-модульований кристал на базі пермалоєвої (Pu , $Ni_{81}Fe_{19}$) плівки

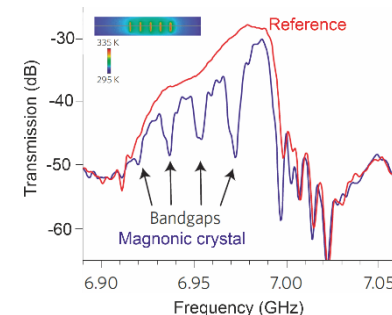


J. Phys. D **50**, 244001 (2017)
Ukr. J. Phys. **64**, 888 (2019)

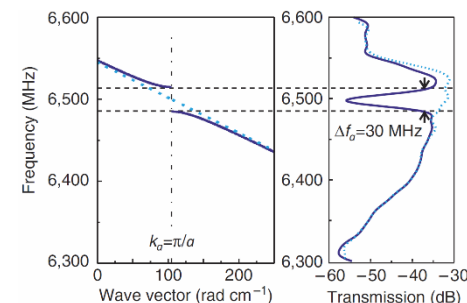
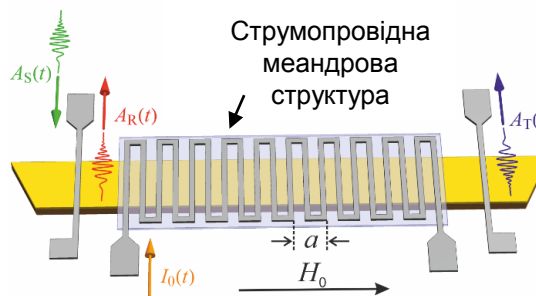
Оптично керований кристал



Nat. Phys. **11**, 487 (2015)



Динамічний кристал, утворений в плівці ЗІГ просторово-модульованим магнетним полем



Nat. Commun. **1**, 141 (2010)

Створено та вивчено різноманітні типи статичних магنونних кристалів та кристалів із динамічно керованими властивостями для операцій з аналоговими та цифровими даними відповідно до запиту в поточний момент часу. Статичні кристали були використані як основа розроблених авторами магنونного транзистора, логічного вентиля, а також комірки динамічної пам'яті.

Реалізовано концепцію **динамічного магнетонного кристалу** – просторово-періодичної магнітної структури, яка може бути «ввімкнена» або «вимкнена» на проміжку часу, коротшому за час проходження спін-хвильового пакета через цю ґратку.

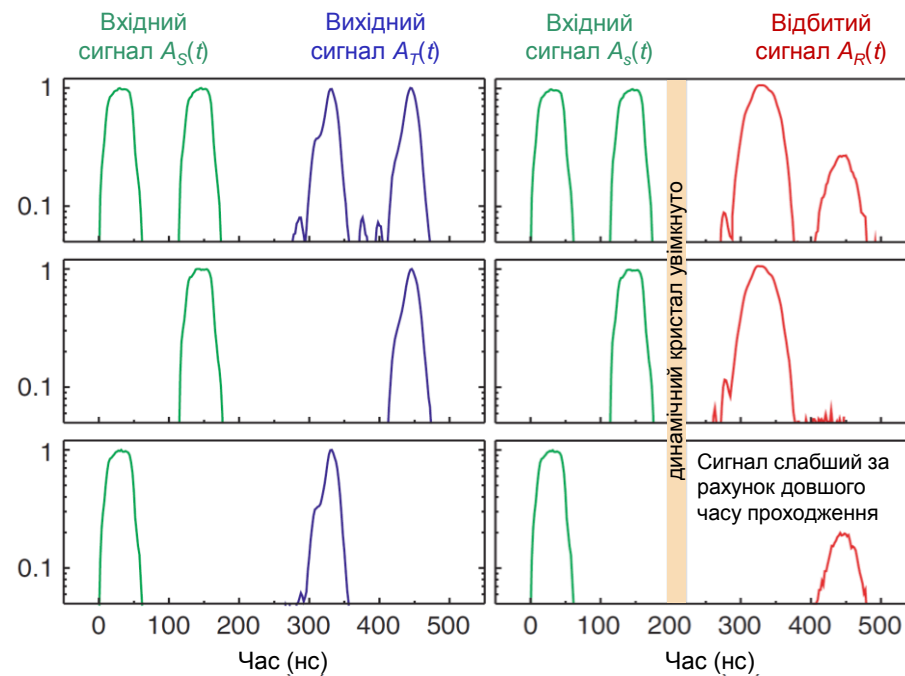
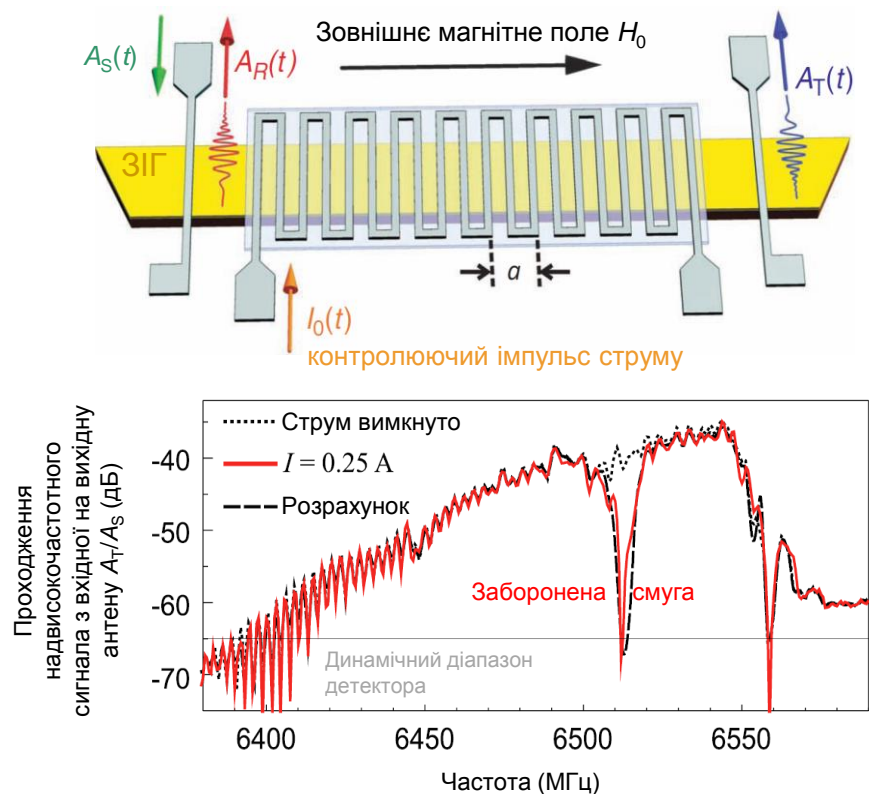
Штучна кристалічна ґратка утворюється в плівці ЗІГ просторово-модульованим магнітним полем електричного струму в меандровому провіднику, розміщеному біля поверхні плівки.

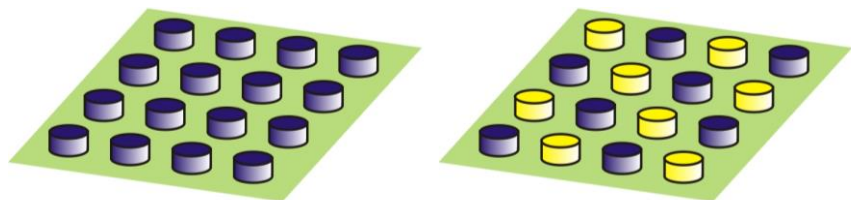
Можливість швидкого керування параметрами кристала використано для вивчення нових фізичних ефектів та реалізації новітніх підходів до функціональної обробки сигналів:

Короткострокове ввімкнення кристала в момент часу, коли вхідний хвильовий пакет знаходиться всередині кристалічної ґратки, призводить до формування за рахунок просторово-розподіленого відбиття відбитого хвильового пакета з інвертованим частотним спектром та оберненим часовим профілем.

Nat. Commun. 1, 141 (2010)

Обернення часового профілю



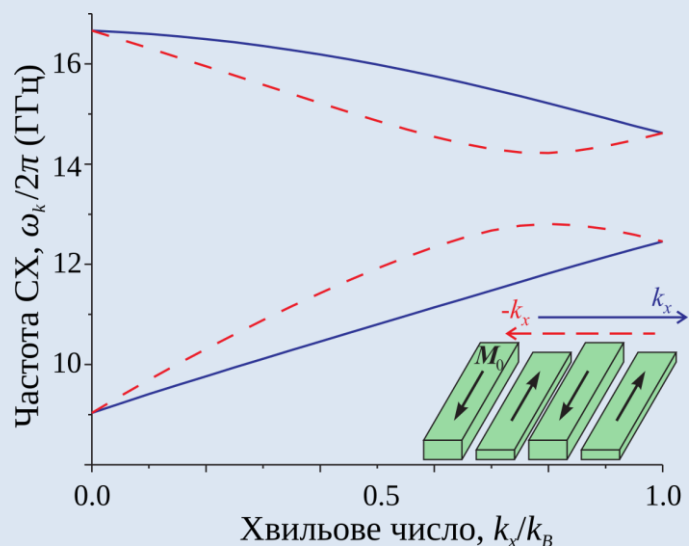


Дипольні магнонні кристали — магнітні аналоги атомних кристалів, в яких роль «атомів» відіграють магнітні наноточки або наносмужки.

Переваги: найширші можливості дизайну дисперсії, мультистабільність.

Розроблена **загальна теорія спін-хвильових збуджень** в дипольних магнонних кристалах.

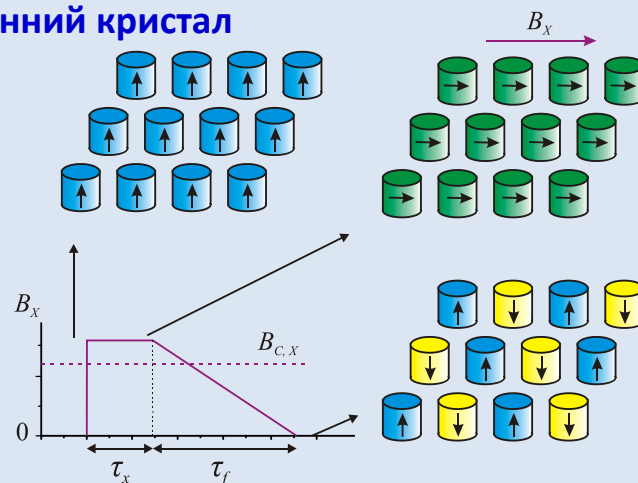
Знайдено **невзаємні спінові хвилі**, встановлено значне підсилення невзаємних властивостей в антиферомагнітному стані ґратки.



Appl. Phys. Lett. **103**, 084207 (2013)

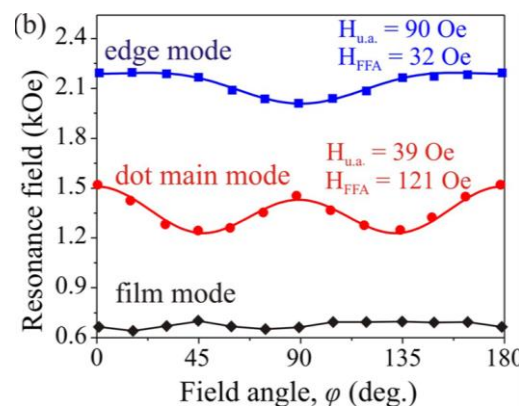
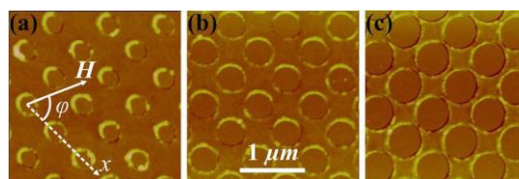
Перебудовний магнонний кристал

Запропоновано спосіб зміни стану магнонного кристалу на основний (антиферомагнітний) коротким (десятки наносекунд) імпульсом магнітного поля.



Appl. Phys. Lett. **100**, 194212 (2012)

Перші спостереження конфігураційної анізотропії в магнонному кристалі



Експериментально виявлено конфігураційну анізотропію в магнонному кристалі та пояснено її природу.

Запропоновано спосіб збільшення анізотропії за рахунок обмінної взаємодії наноточок із суцільною плівкою.

Phys. Rev. B **74**, 060406 (2006)
Appl. Phys. Lett. **107**, 232402 (2015)

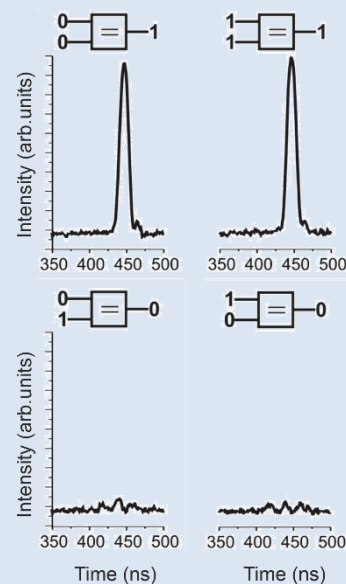
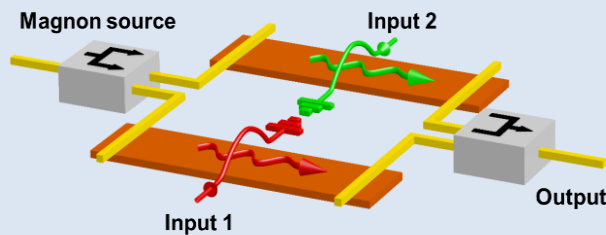
Обробка цифрової інформації з використанням спінових хвиль:

- Фаза та нелінійність спінових хвиль дозволяють зменшити кількість логічних елементів до 10 раз
- Фундаментальні обмеження магنونних елементів співпадають з такими для напівпровідникової електроніки
- Потенціал для обробки даних в ТГц діапазоні частот
- Обробка інформації за кімнатної температури

Nat. Phys. 11, 453 (2015)

Перша реалізація спін-хвильового логічного елементу

Логічний елемент базується на інтерферометрі Маха-Цендера в плечах якого фаза спінових хвиль керується прикладеним струмом. Вихід визначається амплітудою спінових хвиль після інтерференції.



Appl. Phys. Lett. 92, 022505 (2008)

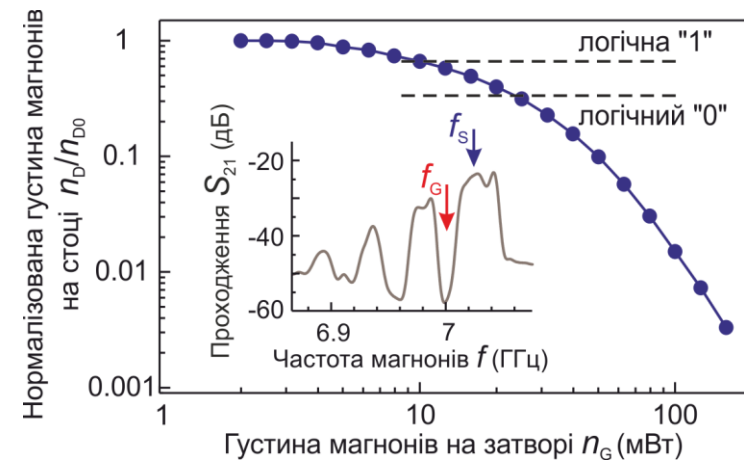
Магنونний транзистор на базі магنونного кристала

Представлено магنونний транзистор, в якому **магنونні струми керують магنونними струмами**. В цьому пристрої густина магنونів, що протікає від витоку до стоку, контролюється магнонами, інжекттованими в затвор транзистора.



Nat. Commun. 5, 4700 (2014)

Подавлення магنونного струму на стоці транзистора

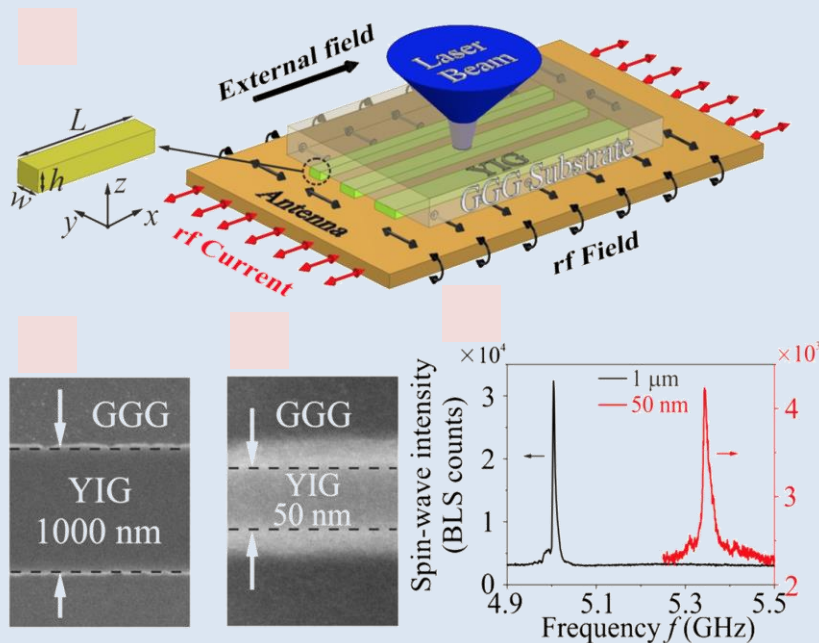


Винайдення магنونного транзистора дозволило створення інтегральних схем в яких вся інформація обробляється в магنونній системі без використання електричного струму

Прототип магнонного транзистора мав міліметрові розміри. Тому ключовою задачею в області магنونіки було **зменшення розмірів елементів до величин порядку 10 нм** (розміри характерні для напівпровідникових пристроїв) та вивчення фізичних властивостей хвиль в них.

Перший магнонний елемент розміру 50 нм

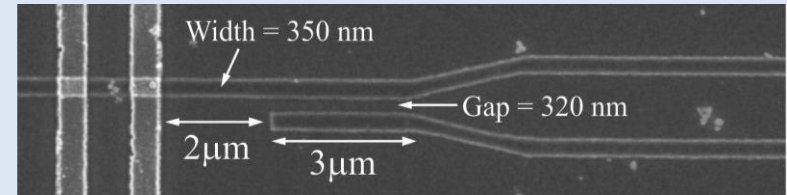
Успішно виготовлені нанорозмірні хвилеводи залізо-іттрієвого гранату (ЗІГ) товщиною 39 нм та шириною до 50 нм за допомогою електронної літографії та іонного травлення. Виявлено ефект розкріплення спінів на краях хвилевода при зменшенні його розмірів.



Phys. Rev. Lett. **122**, 247202 (2019)

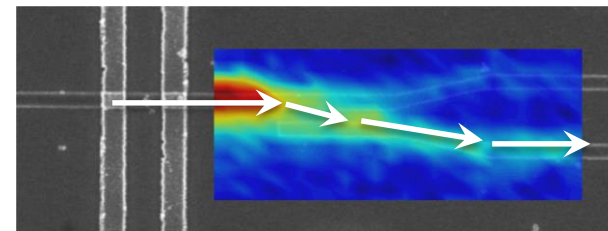
Спрямований спін-хвильовий відгалужувач

Реалізовано нанорозмірний спін-хвильовий відгалужувач — **мультифункціональний елемент магнонних кіл**. Залежно від частоти, він може виконувати роль перехрещення хвилеводів, подільника потужності, демультіплексора, а також може бути динамічно керованим.



Science Adv. **4**, e1701517 (2018)

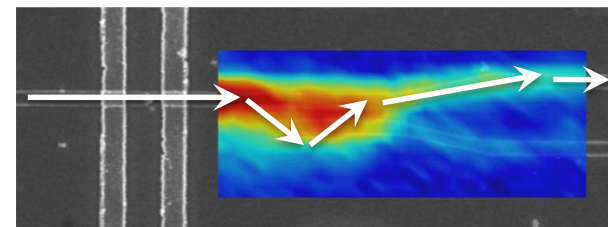
Нелінійність спін-хвильового відгалужувача



Прикладена потужність 0 дБм



Хвиля поширюється на другий вихід



Прикладена потужність 11 дБм

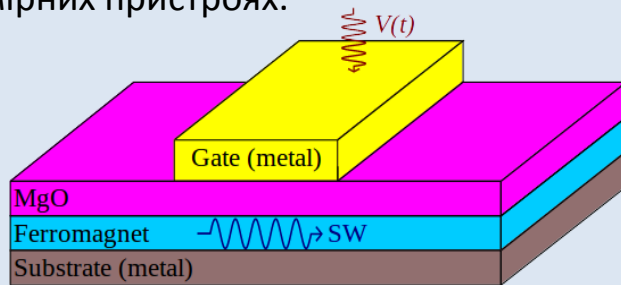


Хвиля поширюється на другий вихід

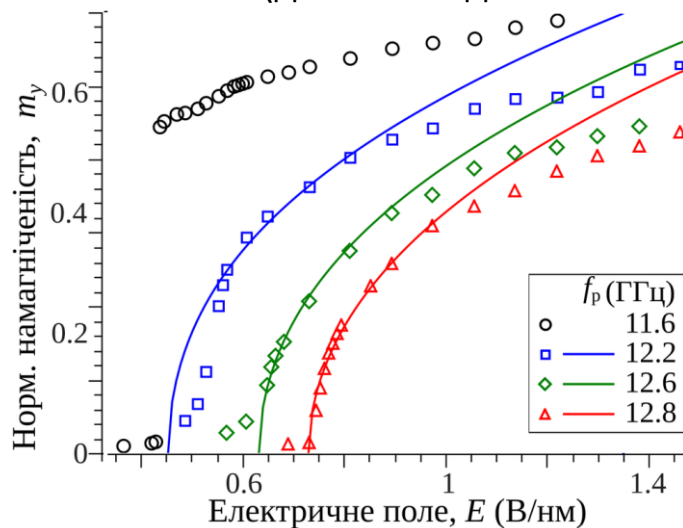
Чисельно показано, що нелінійність відгалужувача може бути використана для створення першої інтегральної магнонної схеми (напівсуматора)

Запропонована ідея **електрично керованих магنونних пристроїв** — використання електричного поля для збудження та контролю спінових хвиль за допомогою новітнього магнітоелектричного ефекту — ефекту електрично керованої магнітної анізотропії (ЕКМА).

Переваги: низьке енергоспоживання, легкість реалізації у нанорозмірних пристроях.

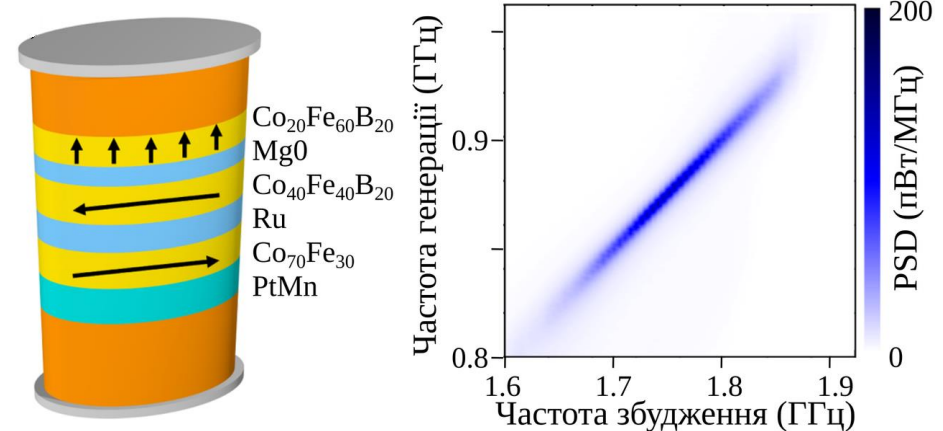


Теоретично та числовими методами показано можливість параметричного збудження **біжучих спінових хвиль великої амплітуди** НВЧ напругою, у тому числі **коротких обмінних хвиль** (довжиною десятки нанометрів)



Phys. Rev. Appl. **1**, 044006 (2014)

Експериментально реалізовано параметричне збудження коливань намагніченості



Nano Lett. **17**, 572 (2017)

Запропоновано і досліджено:

- ЕКМА параметричний підсилювач,
- ЕКМА-керований магنونний кристал,
- гібридні невзаємні пристрої з одночасним використанням ЕКМА та взаємодії Дзялошинського-Морії, ...

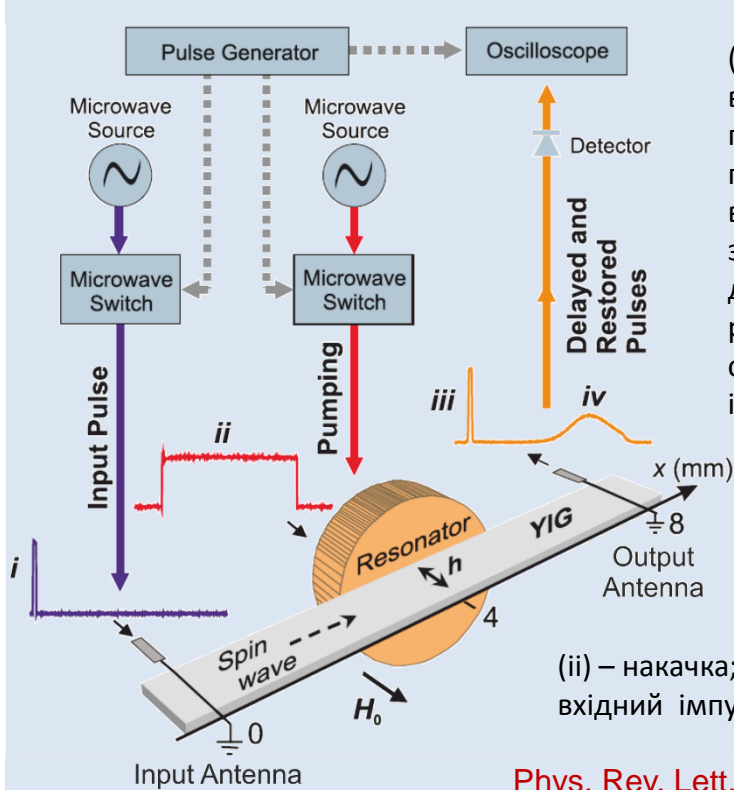
Оцінки паразитних втрат: ~150 пВт у підсилювачі /перетворювачі 10 ГГц частоти на основі Fe/MgO наносмужки 20 нм, що еквівалентно 3 аДж/біт — на порядок менше за споживання CMOS.

Відкрито шлях до створення **високо-енергоєфективних** нанорозмірних пристроїв спін-хвильової електроніки

Вперше отримано та вивчено

- параметричне підсилення пакетів спінових хвиль нестационарною накачкою
- обернення хвильового фронту магнітостатичних хвиль
- неадіабатичну взаємодію спінових хвиль з накачкою
- генерацію та підсилення спін-хвильових солітонів
- обернення релаксації спінових хвиль в магнітних плівках та магнетонних кристалах

Обернення релаксації спінових хвиль



Відновлений сигнал (iv) з'являється на виході в результаті параметричного підсилення вторинних коливаний, збуджених внаслідок двомагнетонної релаксації вхідного імпульсу (i).

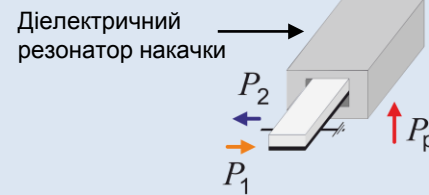
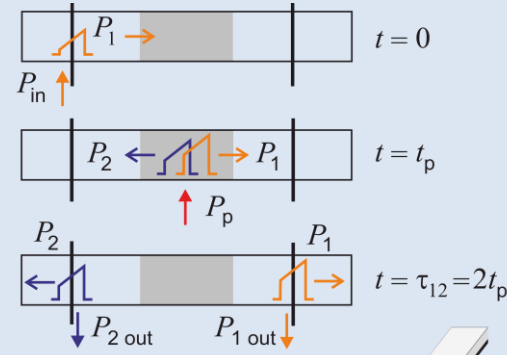
(ii) – накачка; (iii) – затриманий вхідний імпульс (i)

Phys. Rev. Lett. **99**, 227202 (2007)

Phys. Rev. B **79**, 014405 (2009)

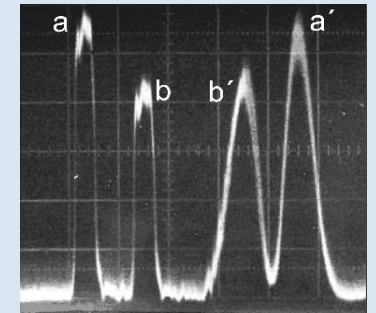
Обернення хвильового фронту та форми сигналів

Схема обернення хвильового фронту



Осцилограма обернення в часі двох-імпульсного сигналу

Вхідний сигнал P_{in} Обернений сигнал P_{2out}



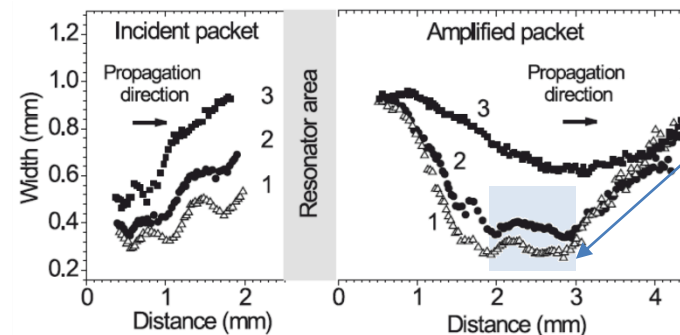
Момент прикладення імпульсу накачки тривалістю 20 нс

JETP **89**, 1189 (1999)

Phys. Rev. Lett. **84**, 3438 (2000)

Параметрична генерація прямих та обернених спін-хвильових двомірних солітонів (булетів)

Дисперсійно уширені спін-хвильові пакети 1, 2, 3 різної початкової інтенсивності, після підсилення резонатором накачки, стискаються, формуючи стабільний булет, що зберігає свою форму в процесі руху.

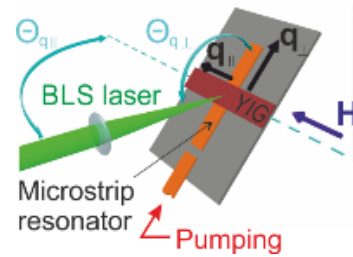


Ділянка стабільності буллета

Phys. Rev. Lett. **94**, 167202 (2005)

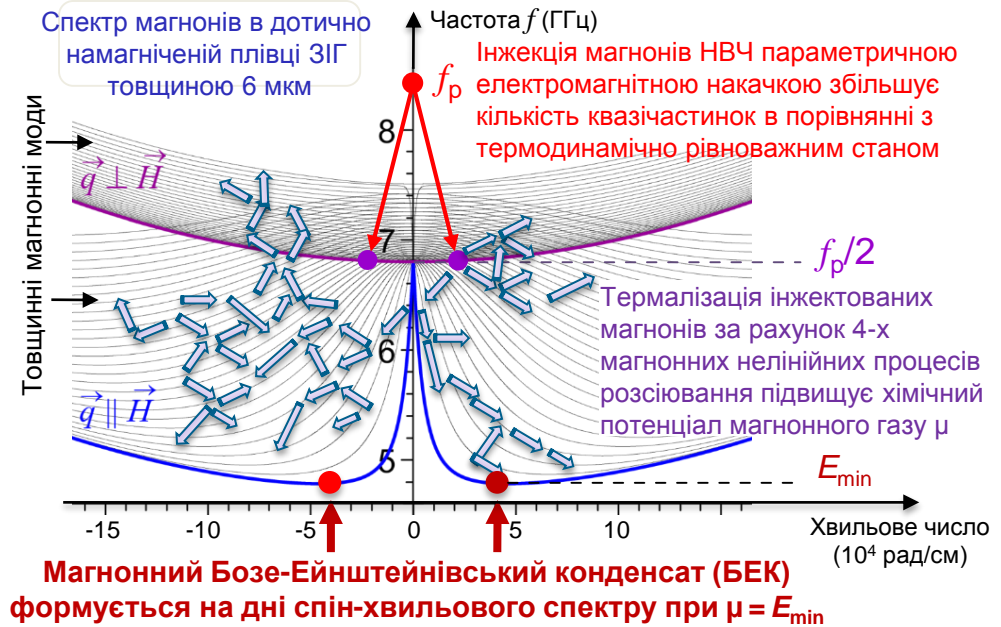
Метод спостереження

Оптична спектроскопія параметрично накачаного магنونного газу на основі непружного розсіювання світла за рахунок ефекту Мандельштама-Бріллюена з розрізненням в часі, просторі, та за частотою і хвильовими векторами спінових хвиль

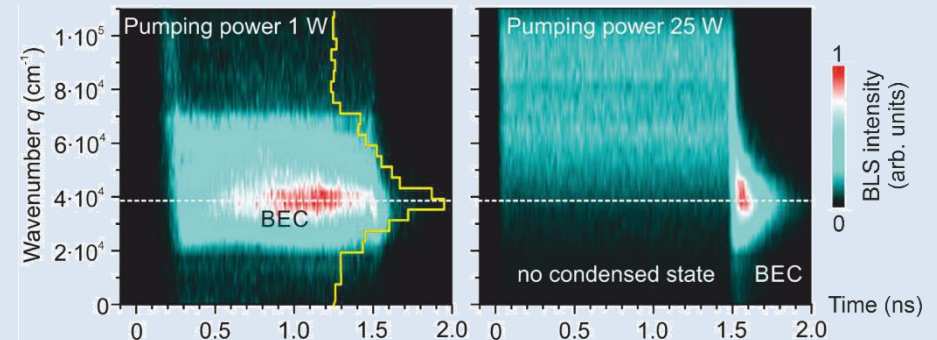


- Відкрито **Бозе-Ейнштейнівську конденсацію** в параметрично населеному газі магنونів при **кімнатній температурі** Nature **443**, 430 (2006)
- Отримано БЕК магنونів під дією некогерентної параметричної накачки Phys. Rev. Lett. **102**, 187205 (2009)
- Вивчено процеси термалізації магنون-фононних газів на шляху до формування магنونного конденсату Phys. Rev. B **91**, 220402 (2015),
Phys. Rev. Lett. **118**, 237201 (2017)
- Отримано Бозе-Ейнштейнівську конденсацію в надгарячому газі магنونів, нагрітому параметричною накачкою, та продемонстровано можливість «випарного» охолодження магنونного газу після її вимкнення Nat. Commun. **5**, 3452 (2014)
- Спостережено збудження фазово-індукованих суперструмів в локально нагрітому магنونному конденсаті кімнатної температури Nat. Phys. **12**, 1057 (2016)

Утворення магنونного конденсату параметричною накачкою



Перехід від бозе-ейнштейнівської конденсації в магنونному газі кімнатної температури до конденсації в **надгарячому** газі магنونів, що випарно охолоджується після вимкнення параметричної накачки



Теорія криволінійного магнетизму

Геометрично керовані взаємодії у викривлених дротах і плівках:

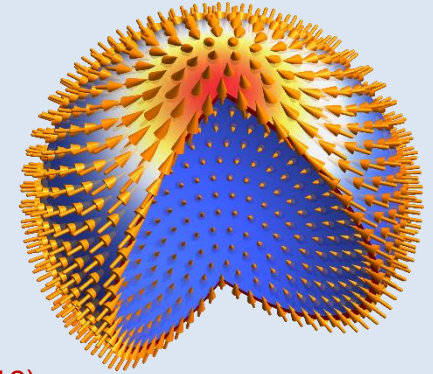
- новий механізм магнітної анізотропії
- новий механізм взаємодії Дзялошинського-Морії

Нові **можливості керування величиною взаємодій** у широких межах та, навіть, їх **знаком**.

Phys. Rev. Lett **112**, 257203 (2014); *J. Phys. A* **48**, 125202 (2015)
J. Phys D (Review) **49**, 363001 (2016)

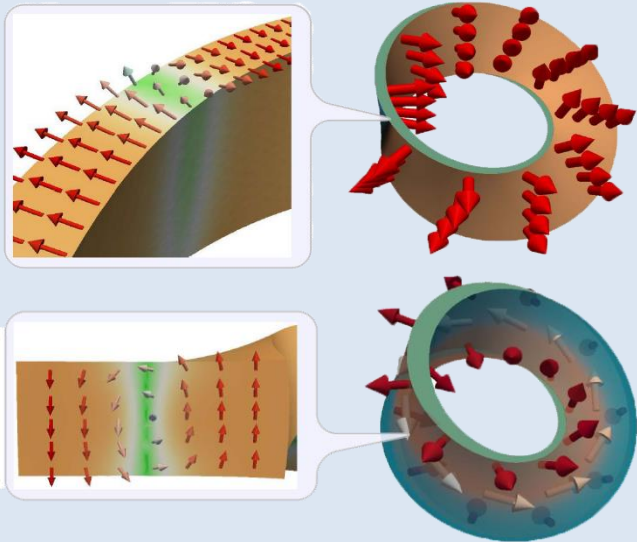
Топологічне структуроутворення: скірміони

Встановлено існування **нового типу магнітних скірміонів**, зумовлених кривиною і спосіб їх генерації магнітним полем



Phys. Rev. B **94**, 144402 (2016)
Phys. Rev. Appl. **10**, 064057 (2018)

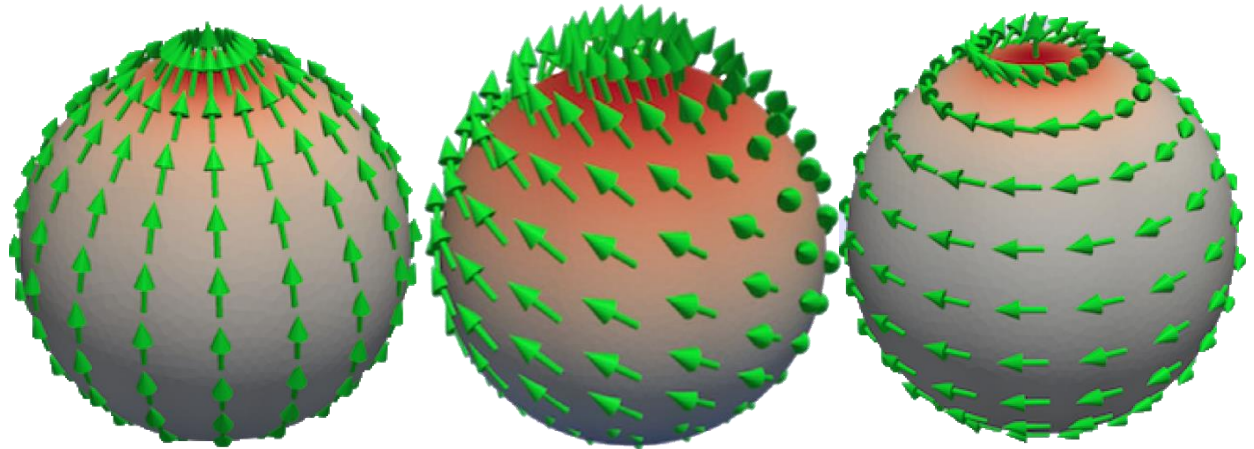
Топологічно захищені доменні стінки в стрічках Мебіуса



Виникнення **топологічно** стійких станів завдяки геометричній топології

Phys. Rev. Lett **114**, 197204 (2015)

Топологічне структуроутворення: вихори в нанооболонках

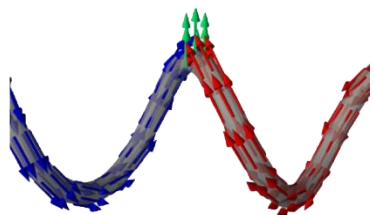


Передбачено різні типи вихорів і фахові переходи між ними в сферичних оболонках

JMMM **443**, 404 (2017)

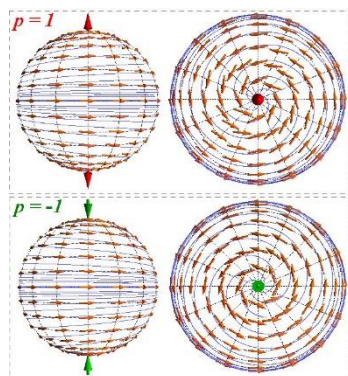
Хіральні ефекти в статичних структурах

Ефекти **спарювання** геометричної і магнітної кіральності в наноспіралях та стрічках Мебіуса



Phys. Rev. Lett **114**, 197204 (2015)
Phys. Rev. B **93**, 094418 (2016)

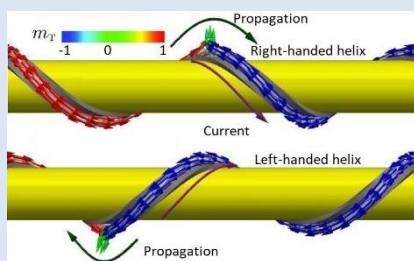
Спарювання полярності і хіральності вихору у сферичній оболонці



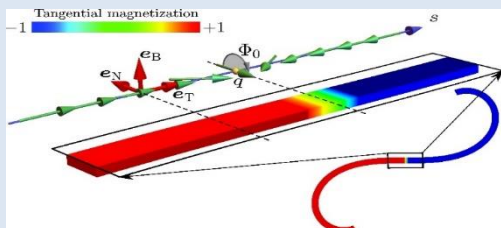
Phys. Rev. B **85**, 144433 (2012)
JMMM **443**, 404 (2017)

Динаміка топологічних текстур

Хіральні ефекти в динаміці стінок в наноспіралях



- Ефект впливу **кручення** на рухомість доменних стінок
- Зумовлений **кривиною** аналог ефекту Уокера



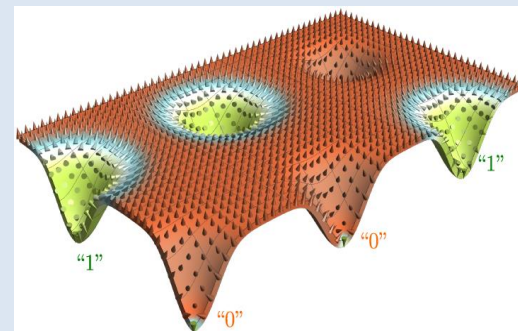
Авторух доменної стінки в спіралі Корню

Phys. Rev. B **93**, 094418 (2016)
Phys. Rev. B **98**, 060409(R) (2018)
Sci. Rep (Nature Research) **6**, 23316 (2016)

Мезоскопічна взаємодія Дзялошинського-Морії

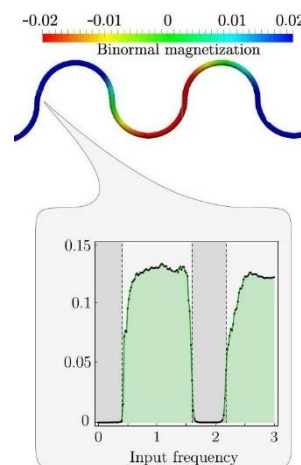
Новий тип **граток** **скірміонів**

Ефект **спонтанної деформації** еластичних магнітних плівок під впливом скірміонів



Phys. Rev. Lett **120**, 067201 (2018)

Криволінійна магنونіка

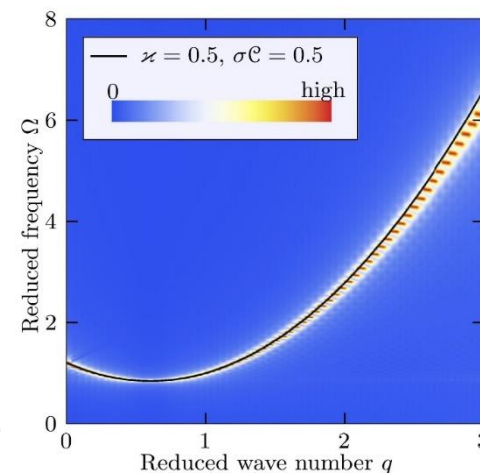


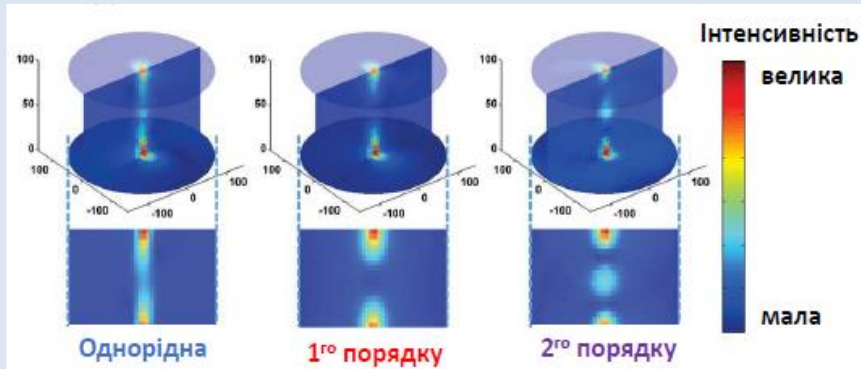
Концепція магنونних кристалів, зумовлених кривиною, та спосіб використання у приладах магنونіки (магنونні фільтри)

Sci. Post **7**, 035 (2019)

Порушення хіральної симетрії в законі дисперсії спінових хвиль в спіралі

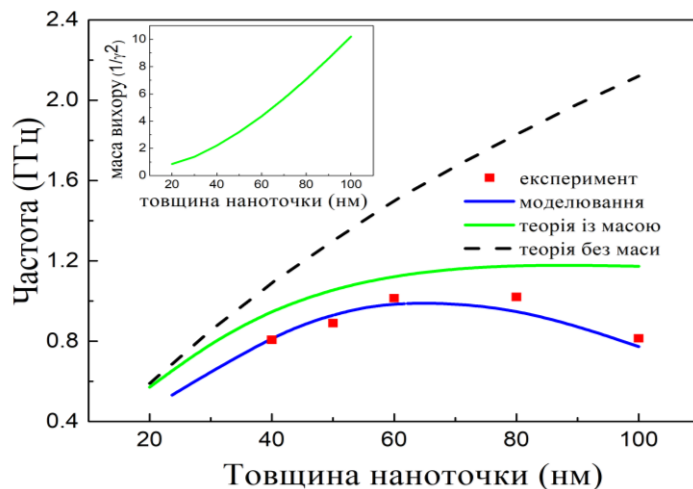
Phys. Rev. B **92**, 054417 (2015)





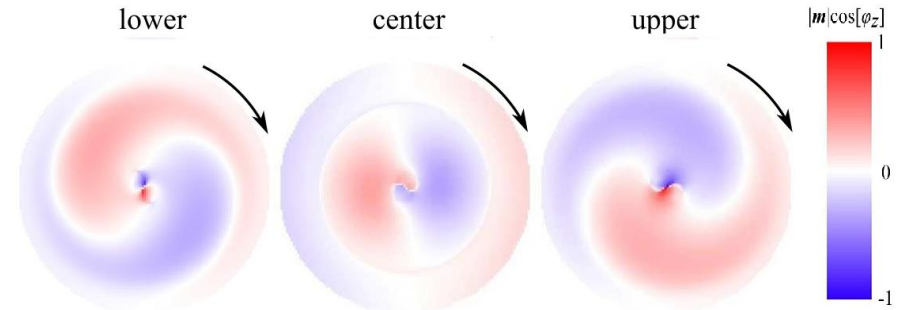
За допомогою широкосмужової спектроскопії феромагнітного резонансу в магнітних наноточках товщиною більше 50 нм були експериментально виявлені **гіротропні моди вищих порядків**.

Sci. Rep. **4**, 4796 (2014), *APL* **104**, 082408 (2014).

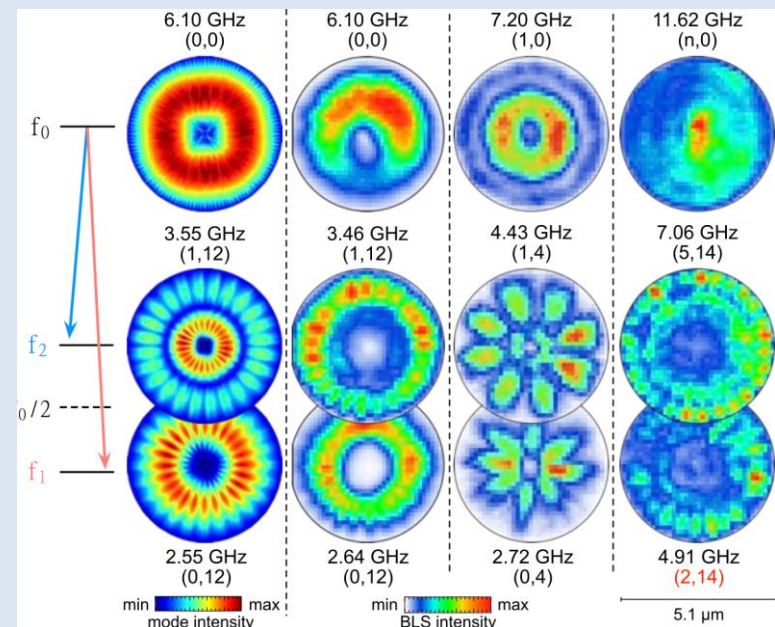


Незвичну залежність частоти найнижчої гіротропної моди від товщини було описано введенням **маси вихору**, яка виникає внаслідок вихрової взаємодії зі спіновими хвилями.

Sci. Rep. **5**, 13881 (2015).

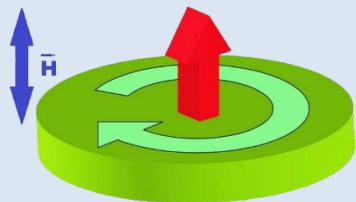


На більш високих частотах було знайдено **нові «закручені» моди**, які мають закручену структуру на поверхнях і радіальні вузли в центральній площині диску. *Phys. Rev. B* **93**, 214437 (2016).

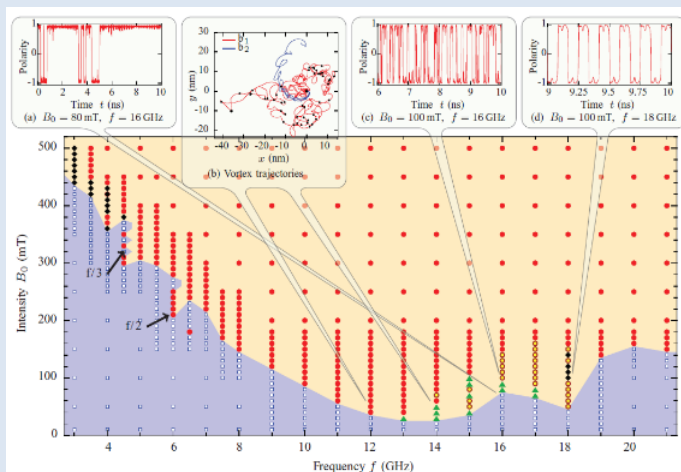


За допомогою нелінійного тримагнотного розсіювання вперше спостережені **вищі азимутальні моди**. За великих азимутальних чисел моди набувають характеру **мод «шепітної галереї»**. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 097202 (2019).

Перемикання полярності осцилюючим магнітним полем

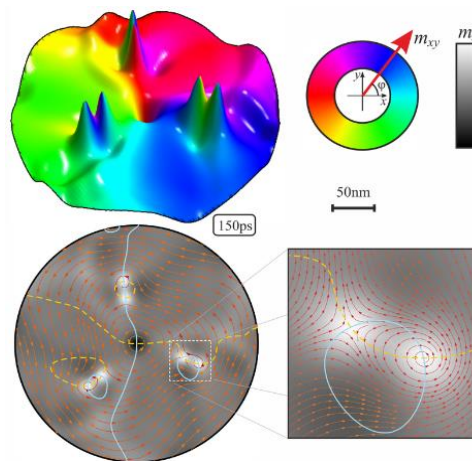


Регулярна і хаотична динаміка

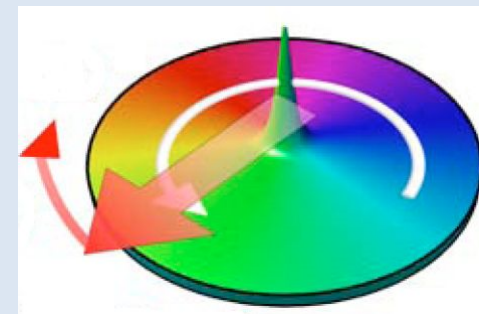


Phys. Rev. B **88**, 014432 (2013)

Ідея — нелінійний резонанс власних магнітонних мод на вихорі, генерація пар вихор-антивихор

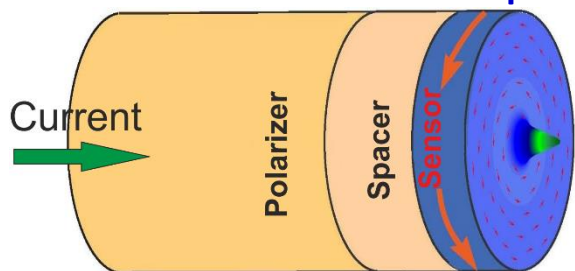


Перемикання полярності магнітним полем, що обертається



J. Appl. Phys. **102**, 043908 (2007)
Phys. Rev. B **80**, 100405 (2009)
Phys. Rev. B **81**, 094431 (2010)

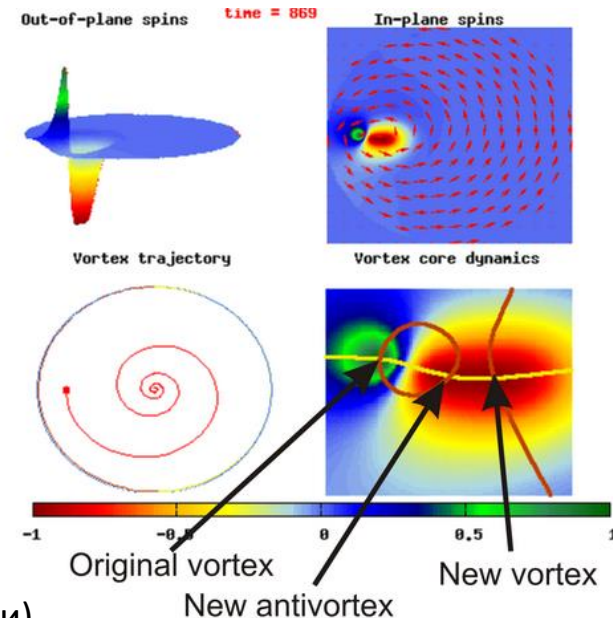
Перемикання полярності вихору в гетероструктурах спін-поляризованим струмом



Механізм перемикання — утворення пар вихор-антивихор

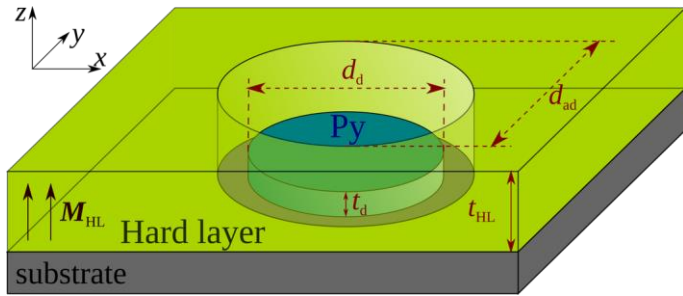
Phys. Rev. Lett **98**, 056604 (2008)
Appl. Phys. Lett **91**, 082509 (2007)

Підґрунтя створення елементів пам'яті на магнітних вихорах, у тому числі з незалежним кодуванням бітів полярністю та хіральністю (двобітні елементи)

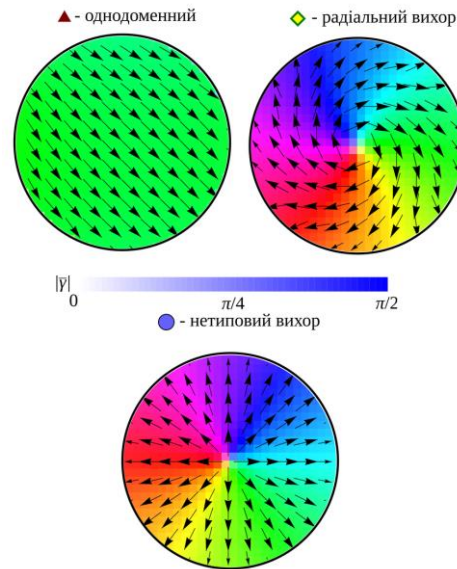
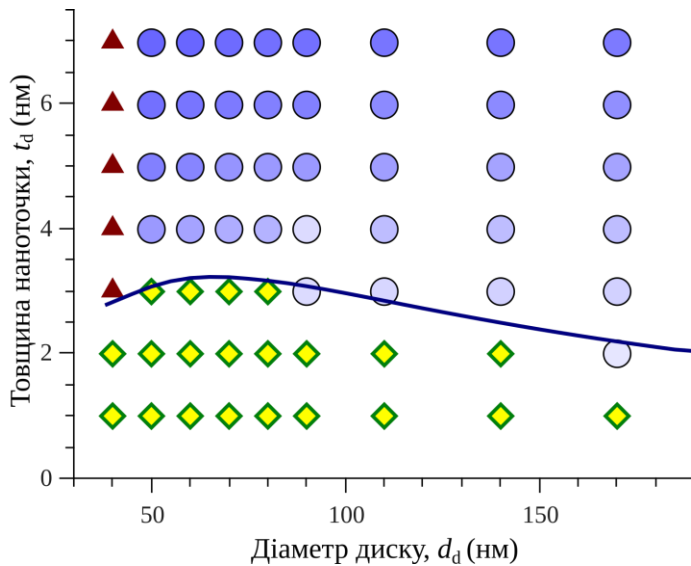


Стабілізація магнітних солітонів у надтонких магнітом'яких плівках та наноструктурах

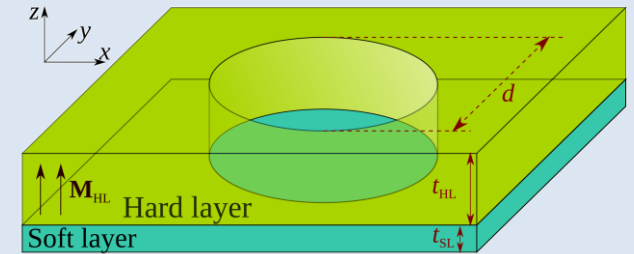
Стабілізація радіальних та нетипових вихорів



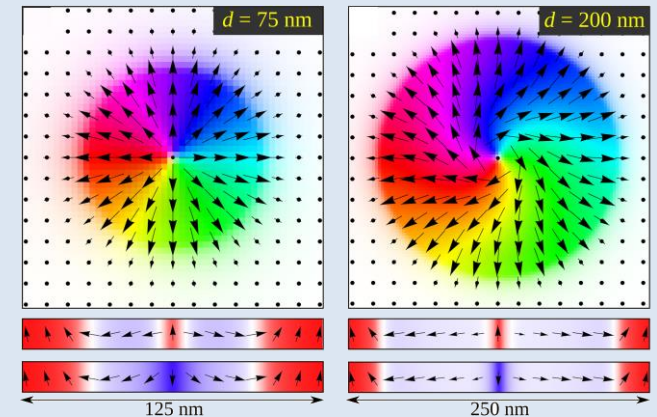
Ідея — використання магнітостатичних полів від магнітожорсткої матриці антиточок для впливу на стан нанодиску



Скірміони та нетопологічні солітони



Скірміон Нееля “Змішаний” скірміон



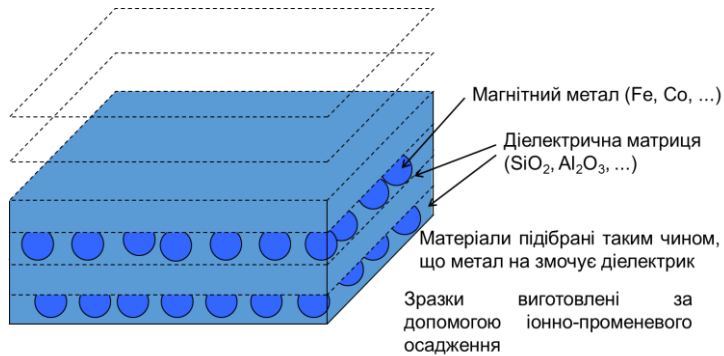
Стіькі скірміони без взаємодії
Дзялошинського-Морія

Інвертована діаграма стійкості — вихори стійкі у малих та тонких дисках одночасно.

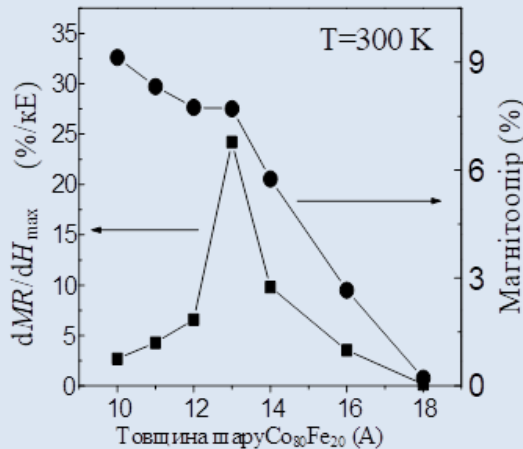
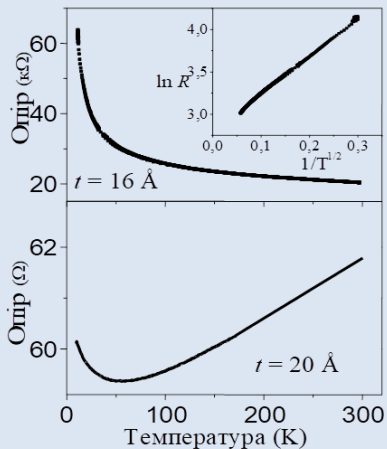
Додатковий ступінь вільності — спіральність вихору

Вказано шлях до створення солітонних спінтронних пристроїв на основі простих феромагнітних матеріалів (пермалой), з вищими частотами роботи (за рахунок малого діаметру) та значно більшою ефективністю спін-трансферу (надтонкі диски та плівки).

Phys. Rev. Appl. **10**, 031002 (2018)
APL Mater. **7**, 081114 (2019)
Phys. Rev. B **101**, 064429 (2020)

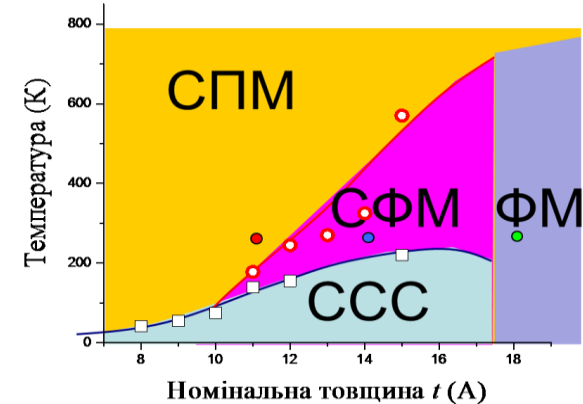


Оскільки поверхнева енергія металевого шару в процесі його конденсації на діелектричному шарі набагато більше поверхневої енергії останнього, то нижче за деяку критичну товщину цей шар розпадається на наногранули. При виготовленні використовується почергове осадження діелектрика і металу.



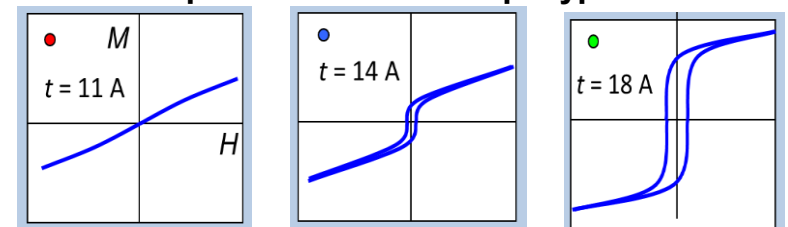
Момент появи від'ємного магнітоопору добре корелює із переходом від металевого до тунельного типу провідності. При подальшому зменшенні t магнітоопір суттєво збільшується через збільшення магнітного розпорядкування в системі.

Фазова діаграма в координатах номінальна товщина - температура



Магнітний стан можна визначити з петель гістерезису

При кімнатній температурі

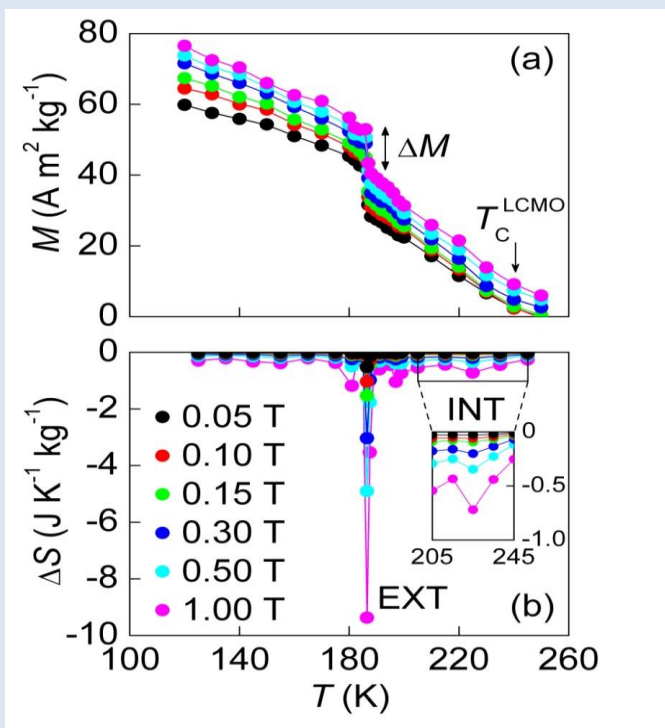


Експериментально виявлена поява феромагнітного впорядкування в структурно неупорядкованій системі дипольно зв'язаних магнітних гранул, так званий **суперферомагнетизм**. Нижче температури Кюрі в системі з'являється фаза типу "спінове скло" яка співіснує з суперпарамагнітною.

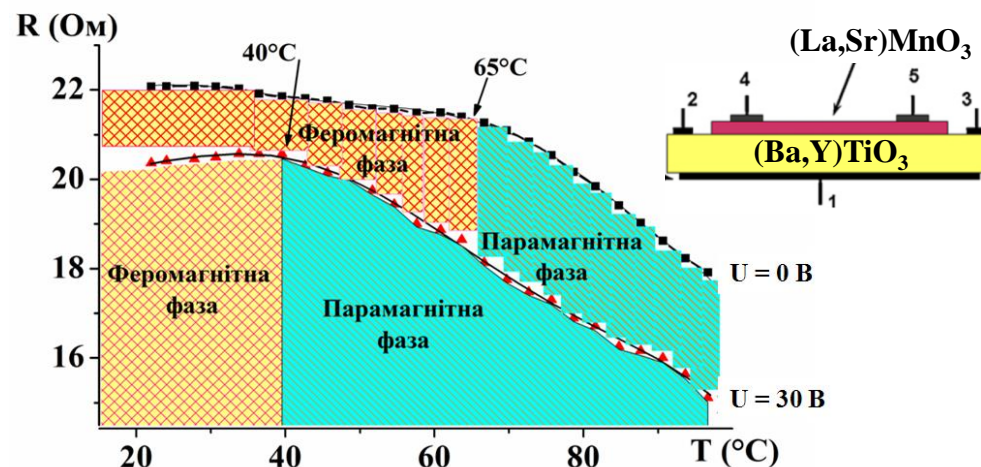
Деформаційно-опосередковані магнітоіндуковані ефекти в гетероструктурах $(\text{La,Ca,Sr})\text{MnO}_3/(\text{Ba,Y})\text{TiO}_3$

18

Вперше експериментально зафіксовано, що перовскітні гетероструктури феромагнетик - сегнетоелектрик можуть виявляти **стимульований гігантський магнітокалоричний ефект**, який є результатом взаємодії деформаційних полів в області міжфазного інтерфейсу. Для конкретної комбінації перовскітних оксидів (манганіт лантану-кальцію / титанат барію) отримано, що величина ізотермічної зміни ентропії, нормованої на одиницю магнітної індукції, є порівнянню з рекордними величинами магнітокалоричного ефекту, досягнутими дотепер. *Nature Mater.* **12**, 52 (2013).



- З'ясовано закономірності зміни магнітних, магніторезистивних та резонансних параметрів **композитних перовскітних гетероструктур «феромагнетик - сегнетоелектрик»** під дією зовнішніх магнітного та електричного полів;
- Розроблено методику **електричного керування магнітними** параметрами перовскітних гетероструктур «заміщений манганіт / заміщений титанат»;
- Вказано **шляхи оптимізації параметрів** гетероструктур для підсилення магнітоелектричного ефекту.



Експериментально продемонстровано, що при подачі електричної напруги на сегнетоелектрик між електродами 1 і 2 відбувається зсув температури магнітного фазового переходу в плівці $(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$, а також зниження її електричного опору.

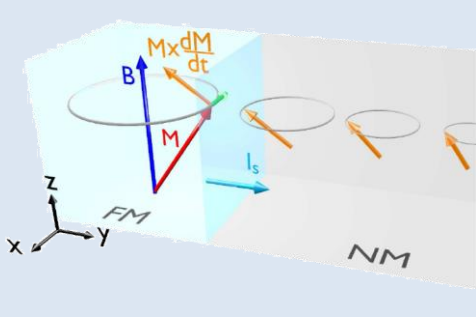
Інтенсивний розвиток спінтронних ефектів на базі спін-орбітальної взаємодії відкрили доступ до принципово нових підходів для збудження, підсилення та детектування спінових хвиль в нанорозмірних структурах.

Nat. Phys. **11**, 453 (2015)

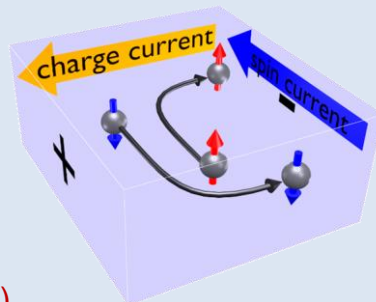
Комбінація спінової накачки з оберненим спіновим ефектом Холла для детектування спінових хвиль

Гетероструктури ЗІГ/Pt були використані для детектування спінових хвиль. Спінова хвиля створює спін-поляризований струм в платині, орієнтований перпендикулярно до інтерфейсу. За рахунок спін-залежного розсіювання в платині, цей струм перетворюється в звичайний електричний струм. В серії понад 10 робіт було показано, що **спінові хвилі будь-якої природи, довжини хвилі та когерентності можуть бути ефективно задетектованими** в такий спосіб.

Спінова накачка

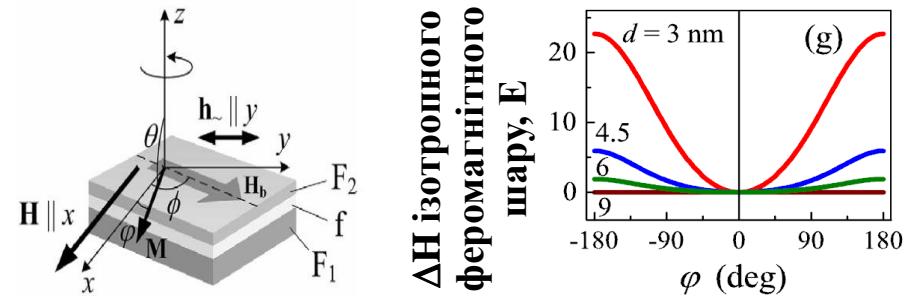


Обернений спіновий ефект Холла



Appl. Phys. Lett. **100**, 082405 (2012)
Phys. Rev. Lett. **106**, 216601 (2011)

Вплив міжшарового зв'язку на дисипативні процеси в багатшарових наноструктурах



Вперше експериментально досліджено і теоретично проаналізовано процеси, які визначають релаксацію магнітних моментів у обмінно-зв'язаній системі ферромагнітних наночарів, де зв'язок між шарами є *температурно-залежним*, а один із шарів характеризується *сильною магнітною анізотропією*. Показано, що підсилення міжшарового зв'язку приводить до **анізотропного (в площині) характеру релаксації намагніченості у всій системі**. Виокремлено роль фізичних параметрів системи (**константа міжшарової взаємодії, енергія анізотропії, дисперсія полів магнітної анізотропії**) у процесах дисипації в зв'язаних ферромагнітних наночарах.

Отримані результати вказують шляхи керування дисипативними процесами в новітніх високошвидкісних багатшарових наноструктурах.

J. Phys.: Cond. Mat. **27**, 446003 (2015),
Phys. Rev. B **94**, 064429 (2016)

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

- Створено новітні типи магнетонних кристалів, вивчено їх фізичні властивості, і продемонстровано широкий спектр задач електроніки надвисоких частот та техніки обробки інформації, які можуть бути вирішені з використанням магнетонних кристалів.
- Розвинуто принципи створення спін-хвильових логічних пристроїв та інших елементів систем спін-хвильової логіки. Розроблено та досліджено перші елементи повністю магнетонної логіки – магнетонний транзистор та нелінійний нанорозмірний спін-хвильовий спрямований відгалужувач.
- Реалізовано низку складних функціональних операцій над спін-хвильовими сигналами за допомогою параметричної накачки: обернення хвильового фронту та часового профілю імпульсних надвисокочастотних сигналів, їх підсилення, збереження, когерентне відновлення, різноманітні операції з солітонами огинаючої спінових хвиль. Відкрито явище високотемпературної бозе-ейнштейнівської конденсації магнетонів під впливом параметричної накачки.
- Запропоновано нові геометричні механізми виникнення анізотропії та взаємодії Дзялошинського-Морії та введено концепцію мезоскопічної взаємодії Дзялошинського-Морії. Розроблено теоретичні основи для опису ефектів, зумовлених кривиною. Продемонстровано способи використання досліджених ефектів для створення нових та покращення характеристик розроблених пристроїв магнетоники та спінтроники.
- Вивчено динамічні властивості магнітних солітонів – магнітних вихорів. Запропоновано способи перемикування полярності та хіральності вихорів надвисокочастотним магнітним полем та спін-поляризованим струмом. Запропоновано спосіб суттєвого підвищення ефективності та швидкодії спінтронних пристроїв на основі магнітних вихорів.
- Створено та досліджено новітні матеріали для потреб спінтроники та магнетоники, які демонструють такі унікальні та корисні властивості, як суперферромагнітний стан, гігантський магнітокалоричний ефект, ефект колосального магнітоопору, утворення саморганізованих структур. Розроблено спінтронні гетероструктури для детектування коротких обмінних спінових хвиль та створення ефективних температурно-керованих пристроїв.