

# «Фізичні основи створення функціональних магнітних матеріалів для наноелектроніки та нанобіотехнологій»

Цикл робіт  
висунений Інститутом магнетизму  
Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

Кількість публікацій: 202, в т.ч. 4 монографій, 175 статей (165 – у зарубіжних виданнях).

Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 7808,

h-індекс (за роботою) = 51;

згідно бази даних Google Scholar загальна кількість посилань - складає 12489, h-індекс (за роботою) = 56.

Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 23 патентами, в тому числі патентом Швеції.

До циклу робіт серед іншого входять 12 статей в журналах Nature Publishing Group, 26 статей в - Physical Review Letters, 42 статті виданнях з індексом цитування більше 7, в тому числі Advanced Materials , Journal of American Chemical Society, Chemistry of Materials, Angewandte Chemie - International Edition.

# Автори

Голуб Володимир Олегович (13.09.1965, д.ф.-м.н., снс, зав відділом, ІМаг НАНУ та МОНУ)

Горобець Оксана Юріївна (14.10.1976, д.ф.-м.н., професор, НТУУ «КПІ» ім. Сікорського)

Каказей Гліб Миколайович (12.01.1967, д.ф.-м.н., снс, професор, Університет Порто, Португалія)

Левченко Георгій Георгієвич (14.09.1947, д.ф.-м.н., професор, член-кор. НАНУ, зав відділом, ДонФТІ ім. Галкіна НАНУ)

Мелков Геннадій Андрійович (24.09.1939, д.ф.-м.н., професор, КНУ ім. Тараса Шевченка)

Серга Олександр Олександрович (29.11.1964, д.ф.-м.н., професор, Технічний університет Кайзерслаутерн, Німеччина)

Тарапов Сергій Іванович (02.09.1954, д.ф.-м.н., професор, член-кор. НАНУ, зав відділом, ІРЕ ім. Усикова НАНУ)

Убізський Сергій Борисович (24.07.1961, д.ф.-м.н., професор, Національний університет "Львівська політехніка")

# ОПИС ЦИКЛУ

## Молекулярні і кластерні магнетики - основа сучасної наноелектроніки та біотехнологій

*(Левченко Г.Г., Голуб В.О.)*

### Розробка функціональних магнітних матеріалів.

Епітаксійні плівки феритів-гранатів *(Убізський С.Б.)*

Дослідження магнітних наночастинок та їх застосування *(Голуб В.О.)*

Керування хімічними та біохімічними процесами з використанням магнітних полів та біогенних магнітних наночастинок *(Горобець О.Ю.)*

Монокристалічні плівки сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми.

*(Каказей Г.М., Голуб В.О., Серга О.О.)*

Ортоферити та мультифероїки *(Каказей Г.М.)*

### Розробка фізичних принципів функціонування пристроїв спітроніки, магنونіки та магнітофотоніки

Впорядковані двовимірні ґратки магнітних мікро- та нанодисків.

*(Каказей Г.М., Голуб В.О., Серга О.О., Тарапов С.І.)*

Магنونні кристали

*(Мелков Г.А., Каказей Г.М., Голуб В.О., Серга О.О., Тарапов С.І.)*

Наноструктури одновимірних магнітофотонних кристалів

*(Голуб В.О.)*

Взаємодія електромагнітних хвиль з магнітомісткими мета матеріалами

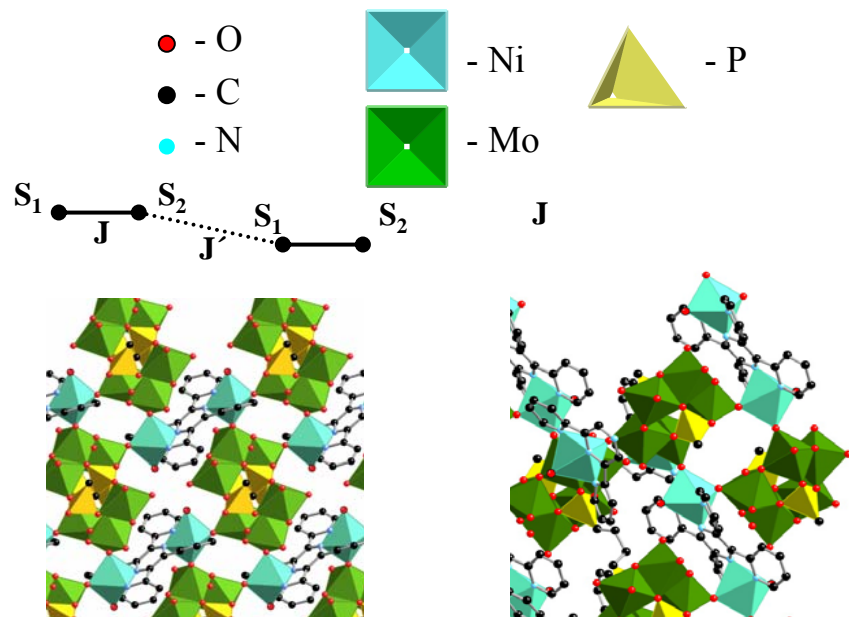
*(Тарапов С.І.)*

Нелінійні та параметричні процеси в функціональних магнітних матеріалах

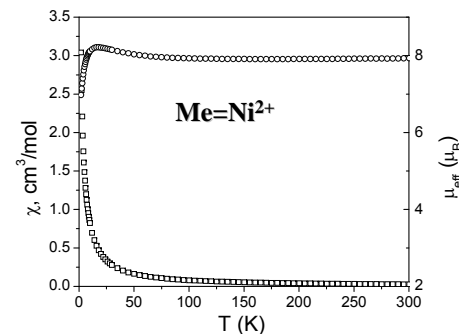
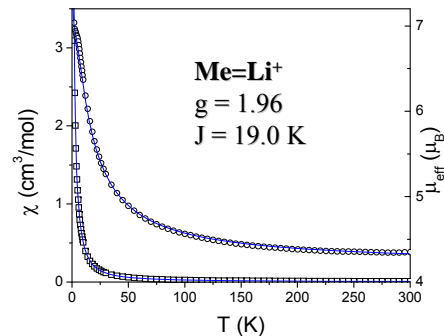
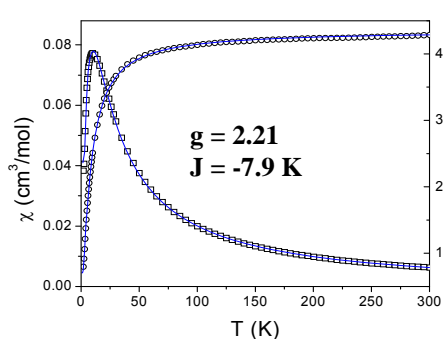
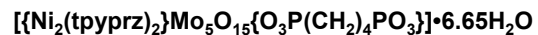
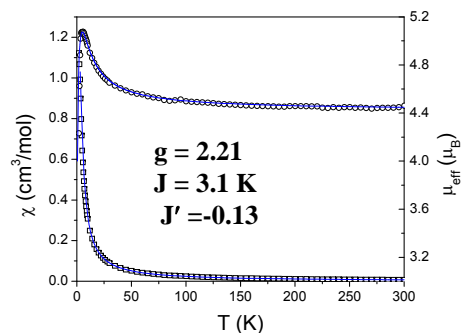
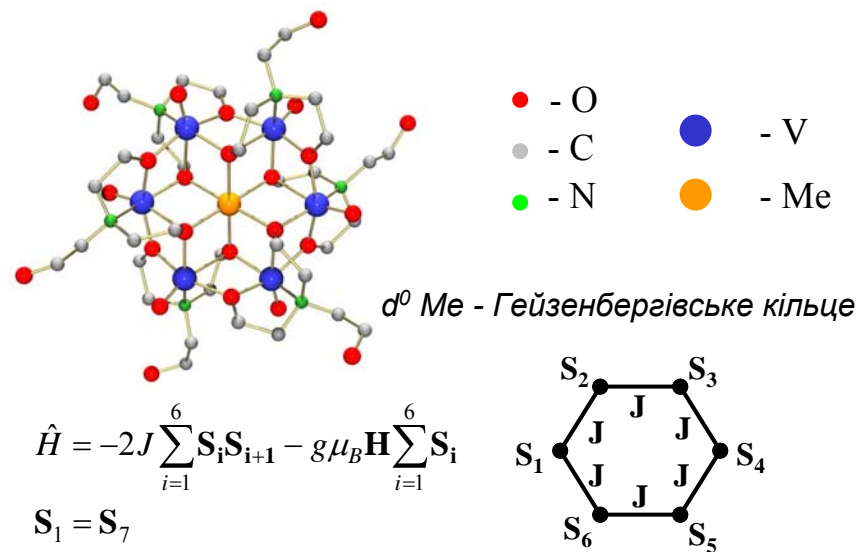
*(Мелков Г.А., Серга О.О.)*

# Дослідження магнітних властивостей низьковимірних молекулярних магнетиків

Зміна знаку обмінної взаємодії при різному взаємному розташуванні магнітних іонів



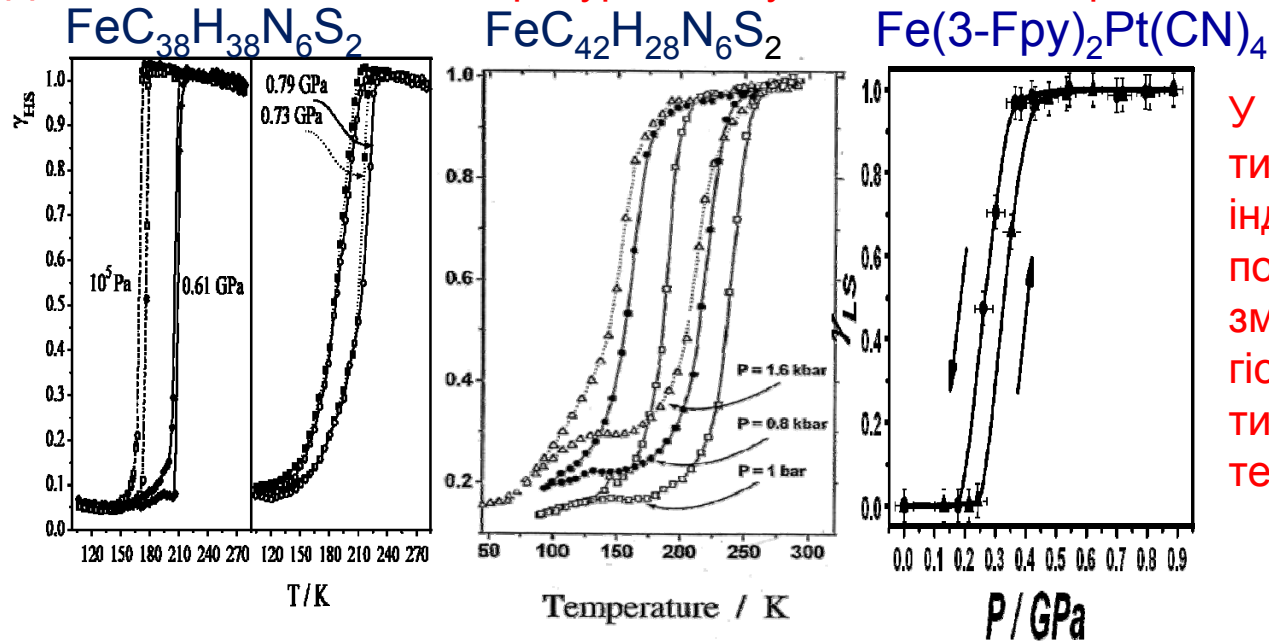
Магнітні взаємодії в магнітному кластері  $[\text{MeV}^{\text{IV}}_6\text{O}_6\{(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\}_6]\text{X}$  (Me = Li, Na, Fe, Co, Ni)



# Поведінка спінового переходу (СП) іонів заліза в молекулярних координаційних сполуках під тиском

Мета - знаходження шляхів отримання спінкроссоверних молекулярних матеріалів для потреб сучасної спінтроніки і збереження інформації на молекулярному рівні.

Досліджено вплив температури і тиску на спіновий перехід.



У результаті аналізу впливу тиску на температурно-індукований СП (підвищення і пониження температури СП, зменшення і збільшення гістерезису) та індукованого тиском СП при кімнатній температурі:

Показано можливість опису СП за допомогою модифікованого рівняння Клапейрона – Клазіуса, отримано зв'язок макроскопічних і мікроскопічних параметрів. Отримано сполуки з кімнатною температурою СП

CHEM-A EUR. J., V: 8, P: 2446-2453, (2002)  
CHEM. OF MATER. V: 10, P: 2426-2433, (1998)  
ADV. MAT. V: 17, P: 2949, (2005)

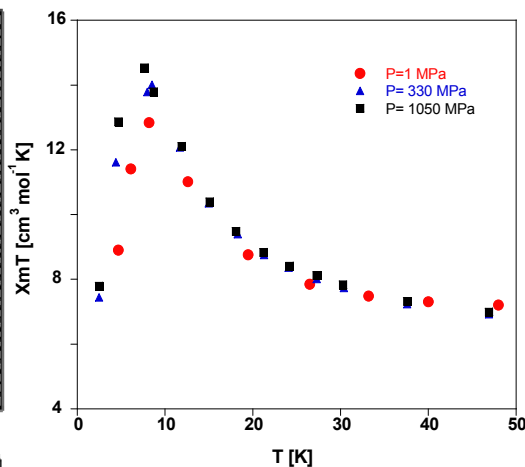
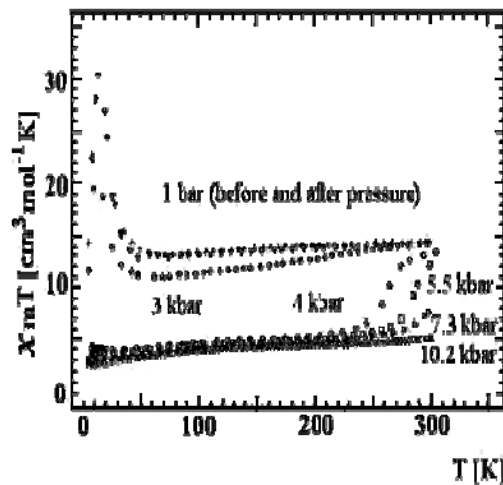
$$dT_{1/2} / dP = (\Delta V_{HL} + d(\Delta_{elast} - \Gamma) / dP) / \Delta S$$

$$\Gamma = \frac{1}{2} [b^2 (\lambda - 1)^2 + b_1^2 (\lambda_1 - 1)^2]$$

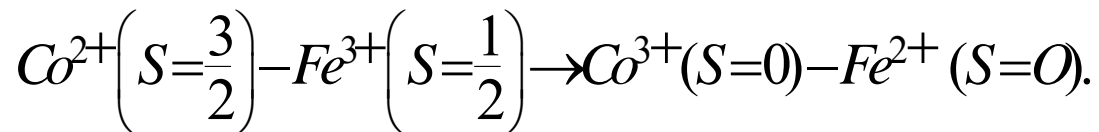
$$\Delta_{elast} = -\frac{1}{2} \omega_0 b_1^2 (\lambda_1^2 - 1) - b^2 (\lambda - 1) - b_1^2 (\lambda_1 - 1)$$

# Квантовий п'єзомагнітний ефект і ефект ізомеризації в молекулярноподібних матеріалах

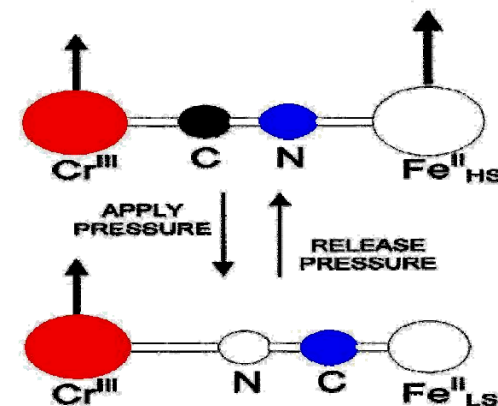
Мета - отримання шляхів регулювання магнітних властивостей унікального класу молекулярноподібних ферімагнітних матеріалів з фeroелектричними властивостями - ціанідів для виявлення можливостей їх використання в сучасній спінтроніці. Був вперше спостережений квантовий п'єзомагнітний ефект, який полягає у включенні та вимкненні магнітного упорядкування тиском шляхом спінового переходу і переведення іонів з магнітного стану в немагнітний і навпаки.



Це пов'язано з двома явищами: Переносом заряду, яку супроводжує зміна спінового стану, і явищем ізомеризації (розвернення ланцюжків C-N на 180 градусів).. Важливо, що ізомеризація і пов'язана з нею зміна спінового стану мають великий час релаксації, що дає можливість для використання цього явища в пристроях запису та обробки інформації.

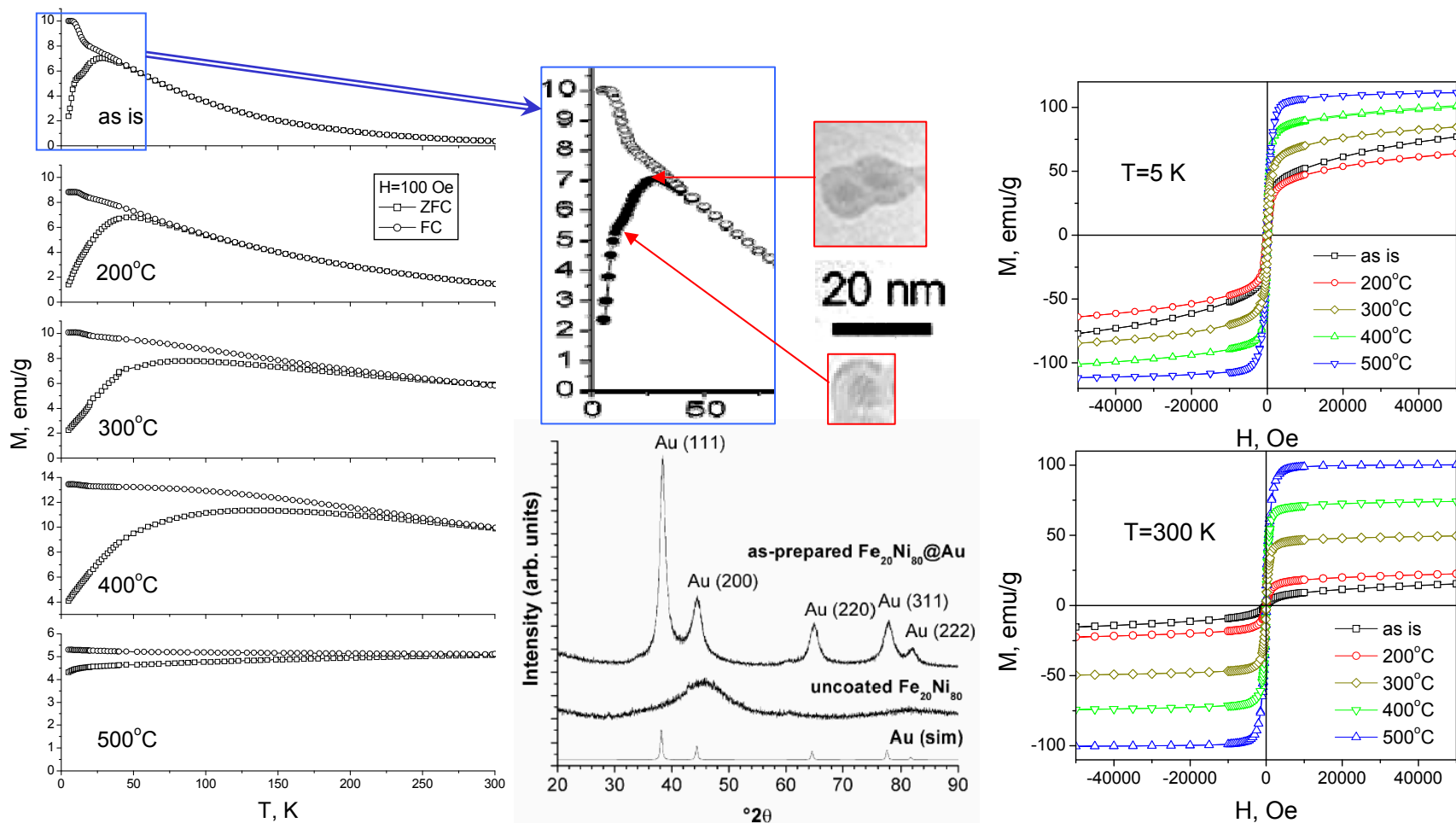


JACS V: 127, P: 4580-4581, (2005)  
 JACS V: 130, P: 15519-15532, (2008)  
 PHYS. REV. B, V: 68, A.N: 024415, (2003)

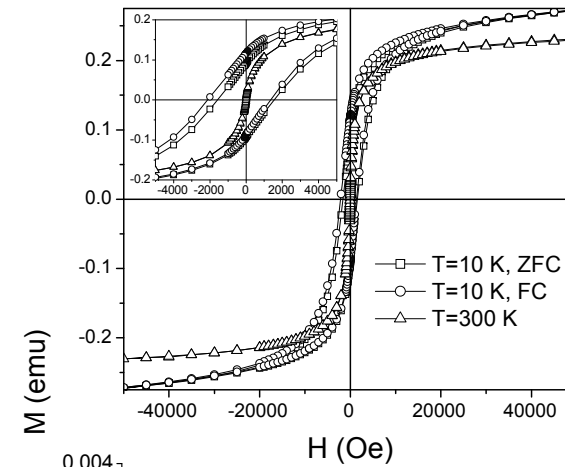
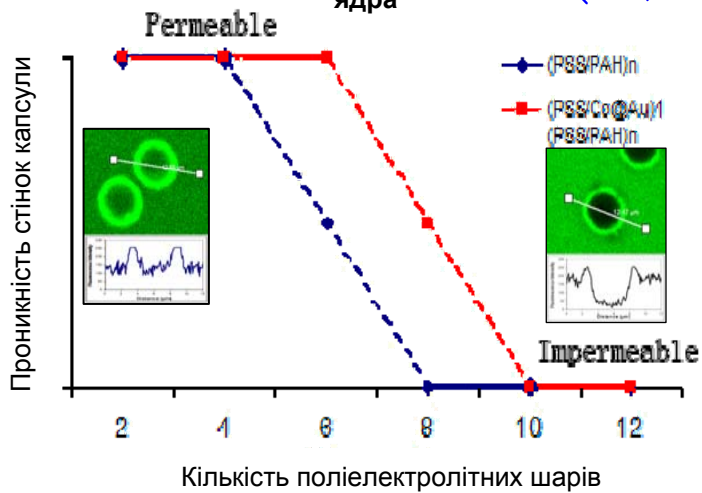
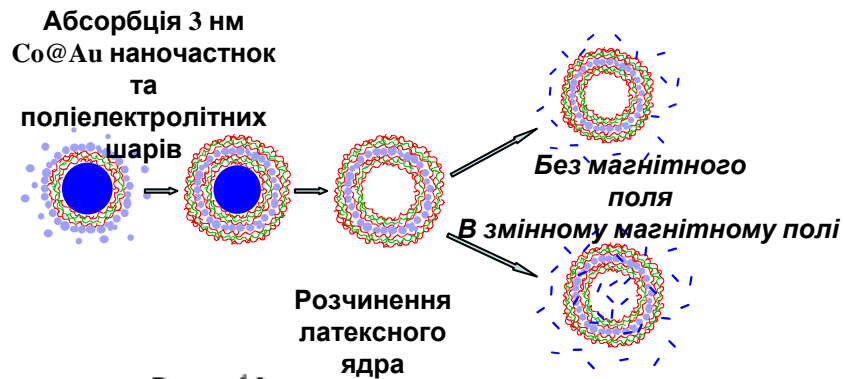
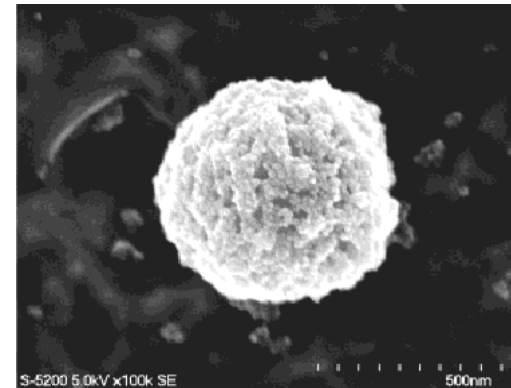
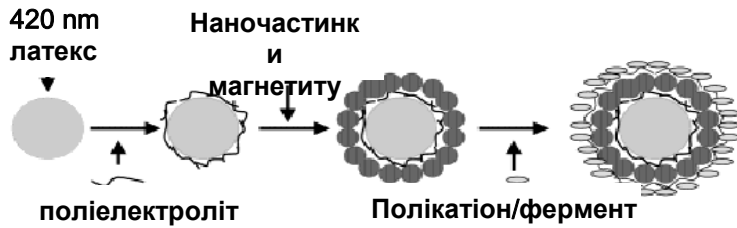


# Використання магнітних методів для контролю розмірів та складу композитних наночастинок

Розроблено магнітні методи, які дозволяють визначити концентрації, об'єм і склад магнітних фаз в складних композитних нанооб'єктах, де результати стандартних методів є неоднозначними. Зокрема, продемонстровано можливість контролю ефективності захисного покриття наночастинок ферромагнітних металів для зменшення впливу зовнішніх факторів, наприклад, окислення.

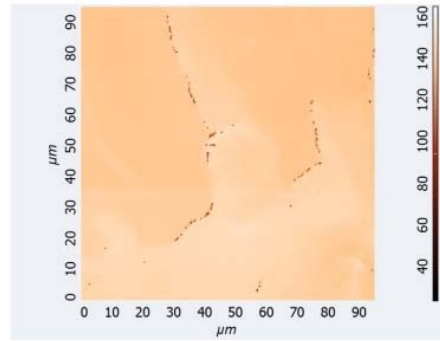
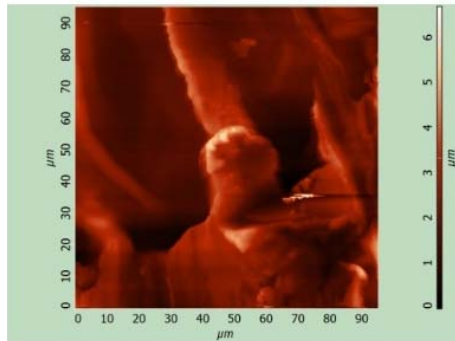


# Зміна проникності оболонки нанобіореактора під дією змінного магнітного поля малої частоти





# Вплив магнітостатичних полів розсіяння біогенних магнітних наночастинок на біохімічні процеси

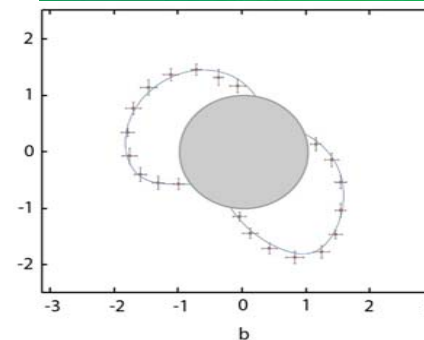
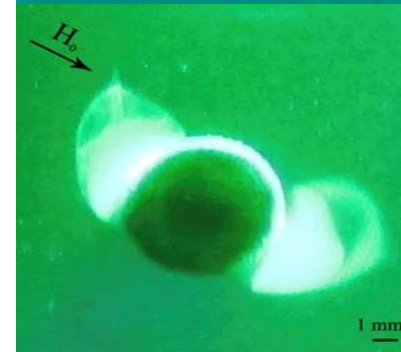
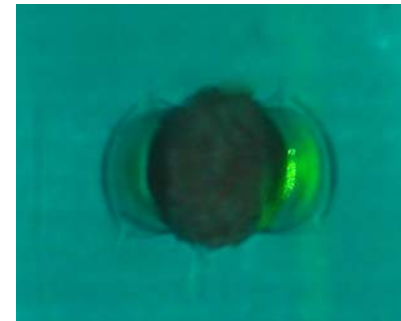


Вперше показано, що біогенні магнітні наночастинок в живих організмах, в тому числі в організмі людини, впливають на процеси метаболізму і існує єдиний фундаментальний генетичний механізм, який відповідає за генетичний контроль процесу біомінералізації біогенних магнітних наночастинок у представників всіх царств живих організмів. Вперше теоретично передбачено існування і експериментально підтверджено наявність біогенних магнітних наночастинок в атеросклеротичних бляшках

На рисунку наведено зображення фрагменту атеросклеротичної бляшки змішаної будови: ліворуч - АСМ зображення; праворуч - МСМ зображення того ж самого фрагменту, на яких видно ланцюжки біогенних магнітних наночастинок.

Внаслідок того, що підвищена кількість біогенних магнітних наночастинок в порівнянні з нормою також спостерігається і при нейродегенеративних, і при онкологічних захворюваннях людини, встановлення зазначеного генетичного механізму біомінералізації має важливі наслідки в медицині, зокрема для діагностики захворювань.

Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Third Edition. CRC Press: New York (2014)



Фазова сепарація електроліту типу “рідина-рідина” при формуванні ефективно парамагнітних нанокластерів під впливом неоднорідного магнітного поля

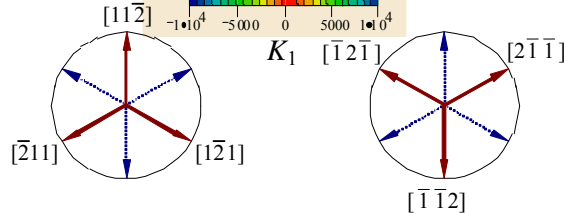
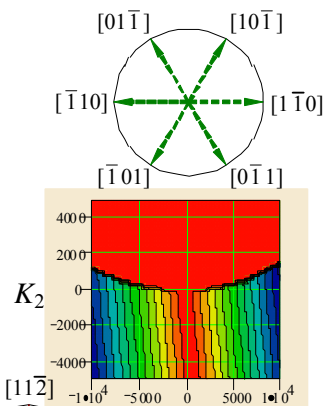
• детекція кластерів на основі ефекту Тіндала при довжині хвилі зеленого світла (500-565 нм)

• теоретична модель форми міжфазної поверхні

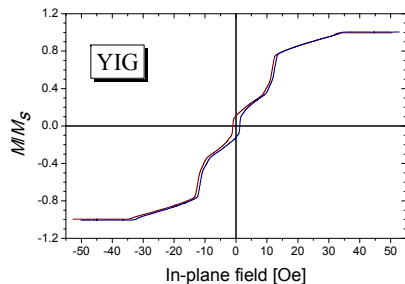
# Орієнтаційні стани намагніченості та перемагнічування (111) орієнтованих епітаксійних плівок ферогранатів з помірною одновісною анізотропією

Основною метою дослідження епітаксійних ферогранатових плівок з помірною або від'ємною одновісною анізотропією було встановлення особливостей їх доменної структури та процесів перемагнічування, які використовуються в індукційних парнограмонічних перетворювачах магнітного поля (ферозондах) та магнітооптичній візуалізації просторових магнітних неоднорідностей

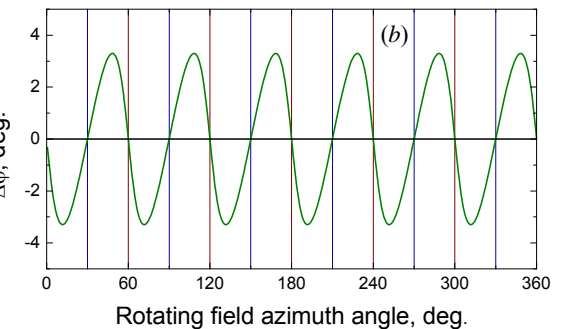
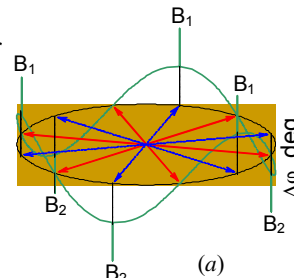
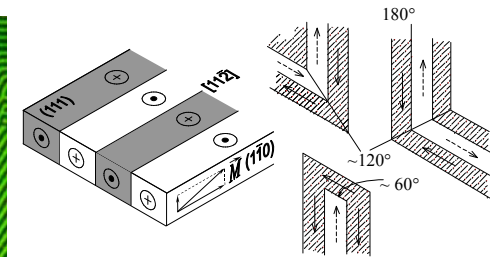
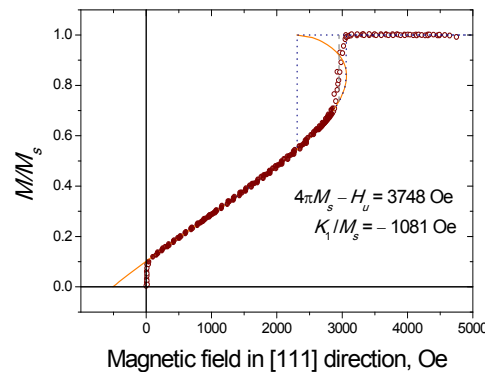
Композитна доменна структура (ДС) плівки YIG (111), схема смугоподібної ДС та утворення меж між блоками смугоподібної ДС.



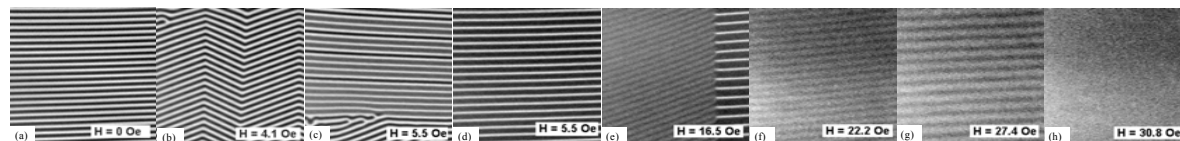
Діаграма магнітних орієнтаційних станів плівки на основі YIG (111) з нульовою одновісною анізотропією в координатах констант кубічної анізотропії: знизу кутові фази, зверху магнітна фаза типу "легка площина"



Перемагнічування плівки LuIG:Pr (111) нормально до площини плівки



Перемагнічування плівки YIG магнітним полем, що обертається у площині плівки: траєкторія руху вектора намагніченості та азимутальна залежність фазового відставання



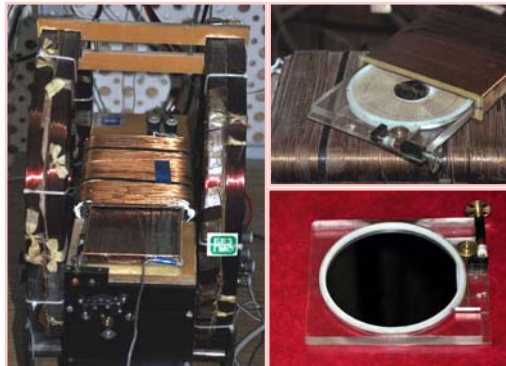
JMMM 195, 575 (1999)  
JMMM 219, 127 (2000)  
JPhys.D:App.Phys. 34, 1178 (2001)

Послідовність трансформацій конфігурацій доменної структури YIG (111) при намагнічуванні у площині плівки вздовж ОЛН

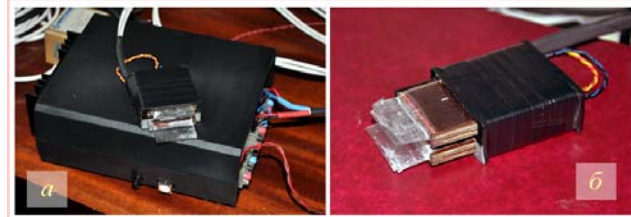
# Застосування моделей перемагнічування багатовісних магнетиків у парногармонічних перетворювачах магнітного поля та для вимірювання характеристик магнітних матеріалів

На основі моделі рівноважного оборотного перемагнічування епітаксійних плівок феритів-гранатів вперше створені та досліджені моделі феромодуляційних парногармонічних перетворювачів магнітного поля на основі оборотного перемагнічування, встановлені оптимальні умови роботи 3D магнітометра/градієнтметра, запропоновано використавувати феромодуляційний ефект для дослідження симетрії та визначення параметрів магнітної анізотропії тонких магнітних плівок, а також запропоновано використовувати феромодуляційний ефект для визначення параметрів розподілу суперпарамагнітних наночастинок за розміром.

**Вимірювання параметрів магнітної анізотропії магнітних плівок:** зовнішній вигляд намагнічуючої системи, вимірювальної котушки, поворотного тримача зразка.



**Прототип ферозонда з оборотним перемагнічуванням епітаксійної плівки на основі YIG**

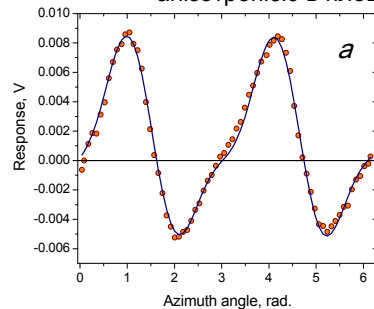


Використання магнітної плівки з системою ОЛН симетрії  $S_n$  дозволяє реалізувати одночасне вимірювання трьох компонент магнітного поля або його просторового градієнту в залежності від конфігурації збудження двохелементного перетворювача.

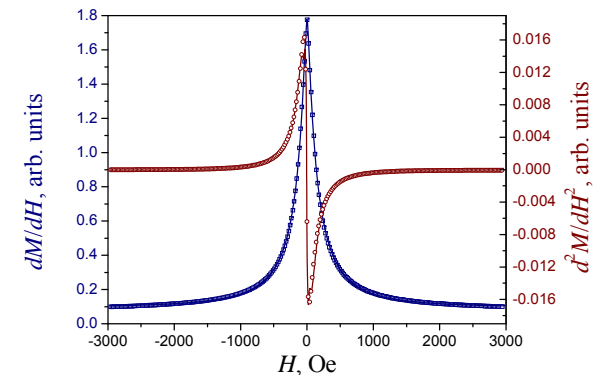
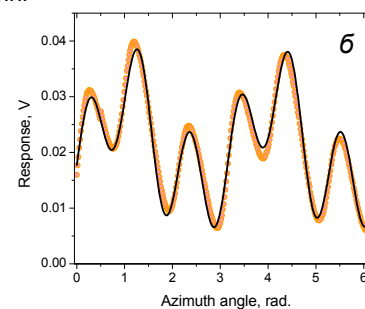


Феромодуляційний відгук може бути застосований для вимірювання другої гармоніки індукційного відгуку на збудження слабким змінним полем в присутності поля зміщення, що в застосування до ансамблю суперпарамагнітних наночастинок дозволяє з апроксимації польової залежності другої похідної намагніченості по магнітному полю визначити розподіл наночастинок за розмірами у значно вужчому інтервалі магнітних полів, що кардинально спрощує апаратне виконання та дозволяє реалізувати експрес-контроль параметрів магнітних наночастинок для біомедичних застосувань.

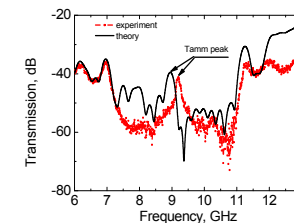
Пермалоєва  $Fe_{20}Ni_{80}$  плівка нанометрової товщини з однією анізотропією в площині



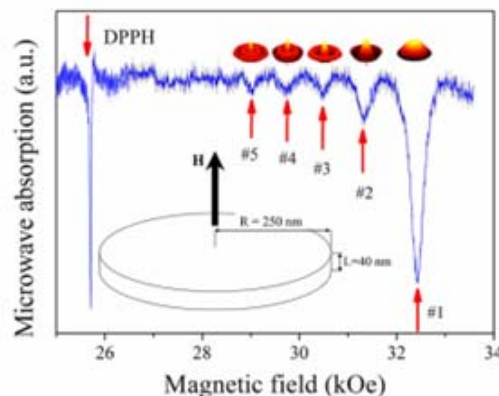
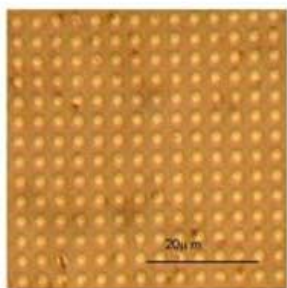
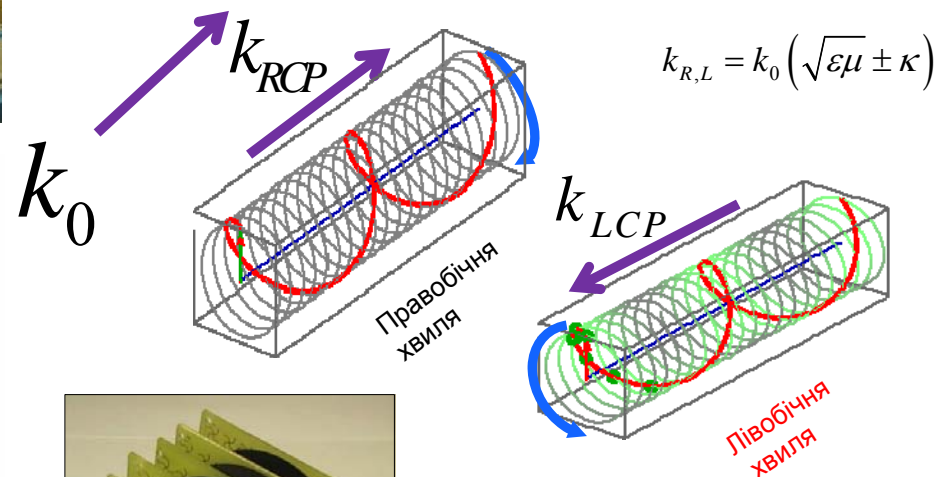
Розорієнтована від (111) епітаксійна плівка YIG



# Радіоспектроскопія магнітоактивних нано- та мета- матеріалів/композитів

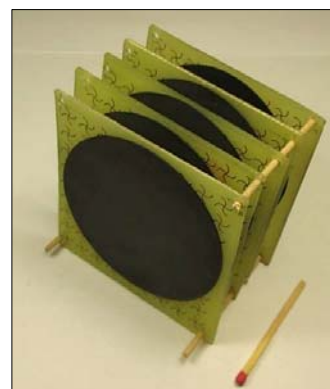


Розроблені нові типи експериментальних комірок для низькотемпературного ESR- експерименту



Збудження спінових мод в періодичних масивах магнітних нанодісков

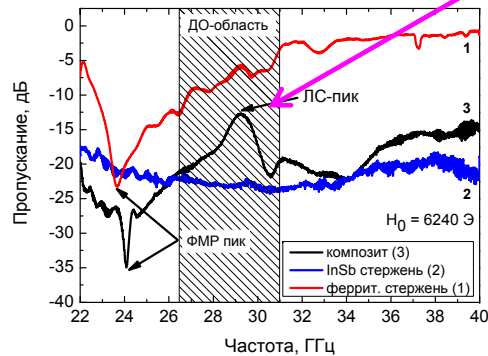
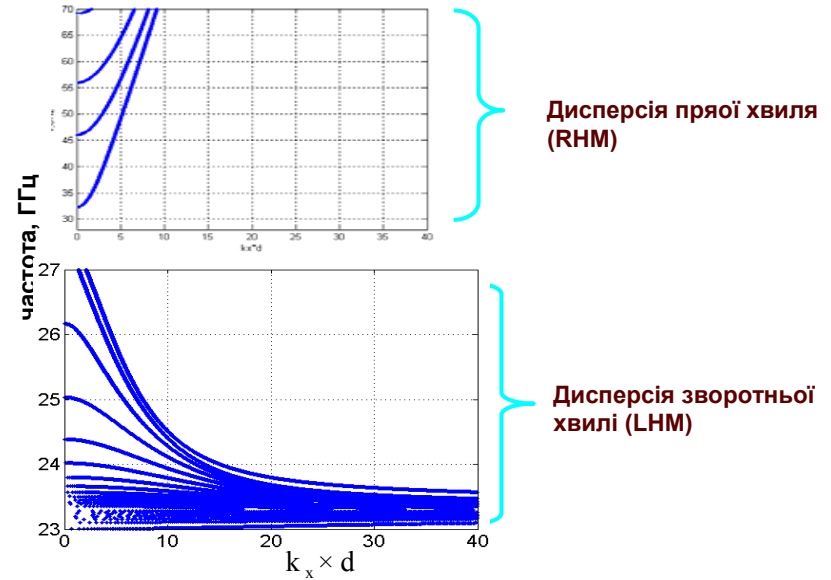
Golub, Kakazey, Tarapov, et al., JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 113, 17B521 (2013)  
Tarapov, Girich, Nedukh, et al., PIER Letters, Vol. 46, pp 7-12 (2014)



- Розроблено методику формування 1D кірального метаматеріала з наперед заданими матеріальними параметрами (діелектричної, магнітної проникності і кіральності) а також - методику вимірювання всіх 3х матеріальних параметрів  
- Продемонстровано лівосторонню поведінку кірального середовища

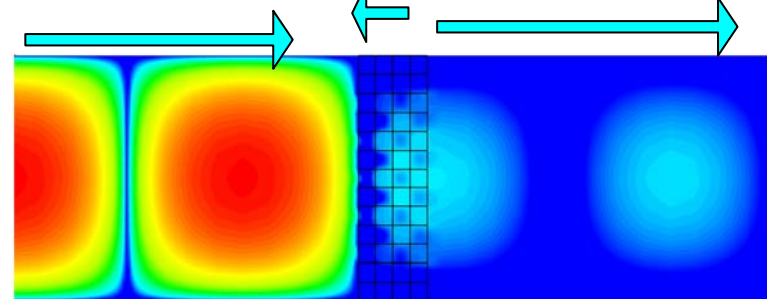
Tarapov, Polevoy, Beletski, Chapter in Book "Contemporary Optoelectronics...", Springer, v.199, p.115, 2016  
Polevoy, Prosvirnin, Tarapov, Tuz, European Physical Journal Appl.Phys., 2013, 61, N3, pp.30501(1-7)

# Прозорість лівостороннього середовища ферит/напівпровідник



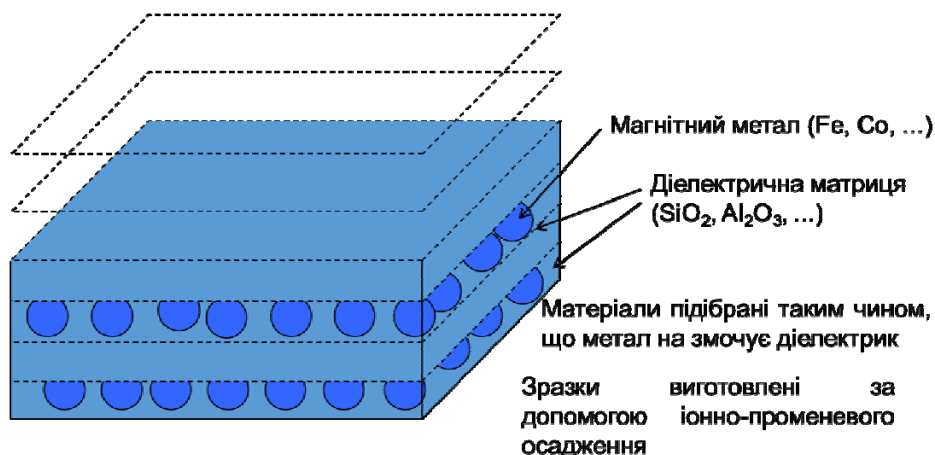
Формування піку прозорості лівобічної структури

Формування зворотної хвилі:

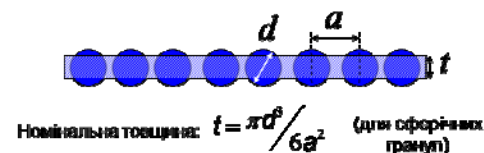


Експериментально продемонстровано від'ємна рефракція, прозорість та наявність зворотних хвиль в композитних магнітних структурах

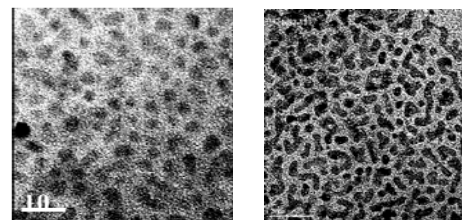
# Магнітні стани в двовимірних гранульованих плівках магнітний метал - ізолятор



Структурні параметри



поперечний розріз

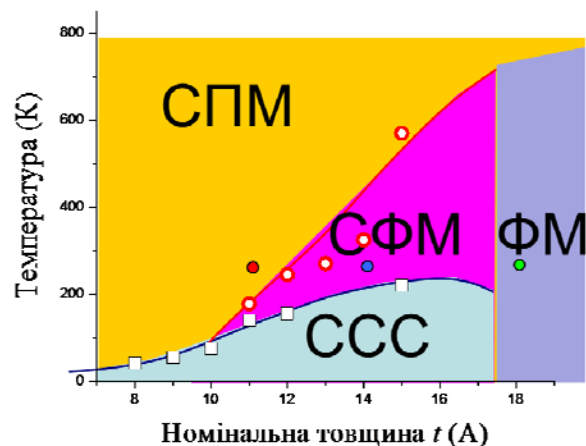


Вид зверху

$t=10 \text{ \AA}$

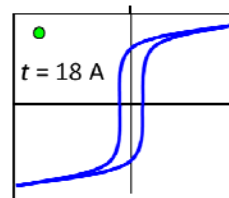
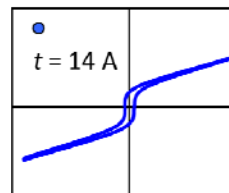
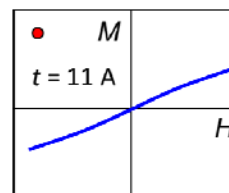
$t=13 \text{ \AA}$

Фазова діаграма в координатах номінальна товщина - температура



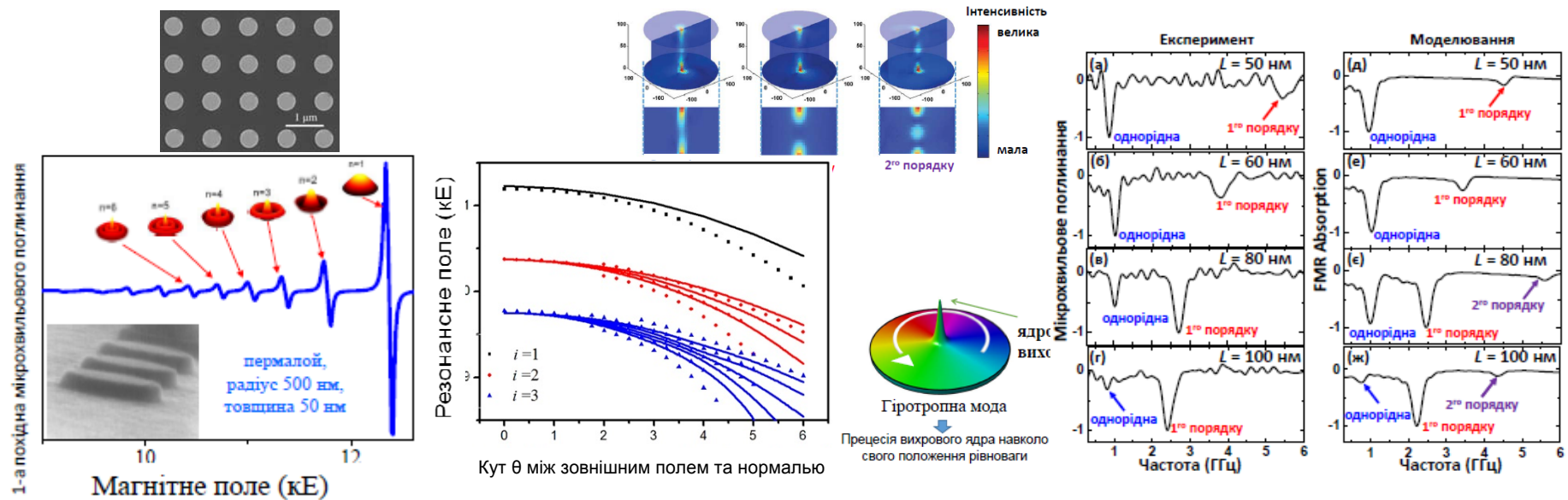
Магнітний стан можна визначити з петель гістерезису

$T = 300\text{K}$



Невпорядковані ґратки магнітних наногранул не тільки представляють інтерес для практичного застосування в спінтроніці, але і дозволяють досліджувати фундаментальні проблеми магнетизму, наприклад існування суперферромагнітного (СФМ) стану, який реалізується через дипольний зв'язок між магнітними моментами випадково розташованих гранул. Було виявлено, що в двовимірних гранульованих плівках магнітний метал - ізолятор СФМ співіснує з іншими магнітними станами – суперпарамагнітним (СПМ), суперспінскляним (ССС) та звичайним феромагнітним (ФМ). Перехід між цими станами може бути реалізовано як зміною номінальної товщини магнітного шару, так і варіюванням температури.

# Ферромагнітні нанодиски у насиченому та вихровому стані



Методом ферромагнітного резонансу досліджувалися ґратки циліндричних міродисків. Коли магнітне поле прикладалося в напрямку вздовж нормалі до площини зразка  $\theta = 0^\circ$ , численні гострі резонансні піки (до 8 піків у разі пермалоевих міродисків) спостерігалися в області полів нижчих за основний пік ферромагнітного резонансу. Той факт, що такі періодичні спектри ніколи не спостерігалися в еталонних суцільних плівках, говорить про те, що поява додаткових мод із дискретною частотою обумовлена кінцевими розмірами дисків в площині плівки і має магнітостатичну природу. Невелике відхилення зовнішнього магнітного поля від нормалі до площини структури (до  $5^\circ$ ) призводить до розщеплення спін-хвильових мод та до залежності кількості розщеплених спектральних ліній від номера вихідної моди: найнижча мода не розщеплюється, перша мода розщеплюється на 3, а п'ята на п'ять рівнів. Розвинута феноменологічна теорія збурень пояснює таку поведінку та дає просте правило, що пов'язує номер моди  $i$  з кількістю розщеплених рівнів як  $2i - 1$ . Профіль кожної з мод є комбінацією функцій Бесселя парних порядків.

Appl. Phys. Lett. 85, 443 (2004).  
 Phys. Rev. B 74, 144424 (2006).  
 Phys. Rev. B 86, 054419 (2012).  
 Nature Sci. Rep. 5, 18480 (2015).

Досліджувалися мікрохвильові спінові збудження у відносно товстих циліндричних нанодисках  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  з радіусом  $R = 150$  нм і товщиною  $L$  від 50 до 100 нм, які знаходилися у вихровому стані. За допомогою широкосмугової спектроскопії ферромагнітного резонансу було виявлено ряд гіротропних мод в діапазоні частот 0.05-6 ГГц у відсутності зовнішнього магнітного поля. Моді представляють собою згинальні коливання струни вихрового ядра з  $n=0,1,2 \dots$  вузлами уздовж товщини диску (див. нижній рис.). Було виявлено, що при товщинах вище 70 нм інтенсивність більш складної вихрової моди  $n=1$  вище, ніж у однорідної моди  $n=0$  (нижній рис.). Інтенсивна вихрова мода 1<sup>го</sup> порядку пропонується в якості кандидата для збільшення потужності генерації мікрохвиль в нанометрових осциляторах на основі тунельних контактів.

Appl. Phys. Lett. 104, 082408 (2014).  
 Nature Sci. Rep. 4, 4796 (2014).  
 Nature Sci. Rep. 5, 13881 (2015).

# Дампінг намагніченості та спінова накачка в надтонких феромагнітних плівках

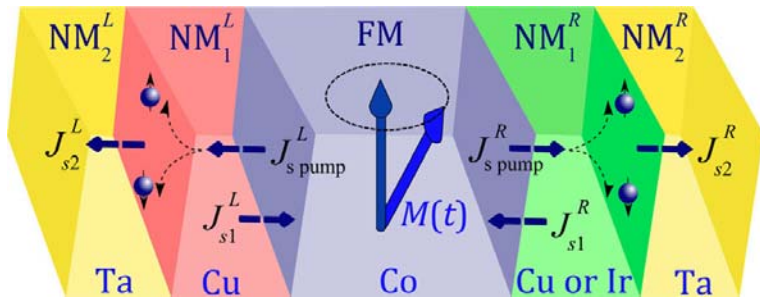


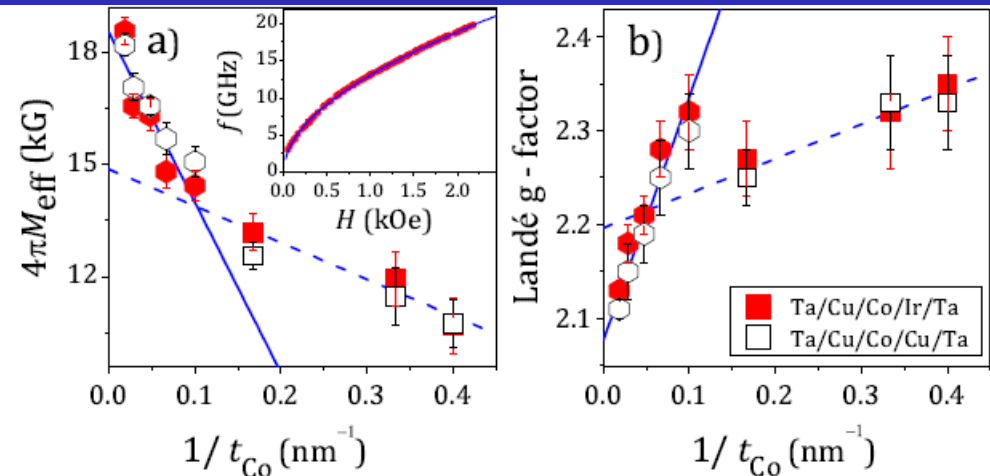
Схема тонкоплівкових структур, які використовувалися в цьому дослідженні, і приклади можливих спінових струмів, що генеруються спіновою накачкою в кобальті.

Основною метою дослідження було зрозуміти механізм спінової накачки в складних структурах і як цей механізм залежить від кристалічних фаз різних шарів. Для цього за допомогою методу феромагнітного резонансу вивчалася динаміка намагніченості тонкоплівкових багат шарових систем, як симетричних (Cu/Co/Cu), так і асиметричних (Cu/Co/Ir).

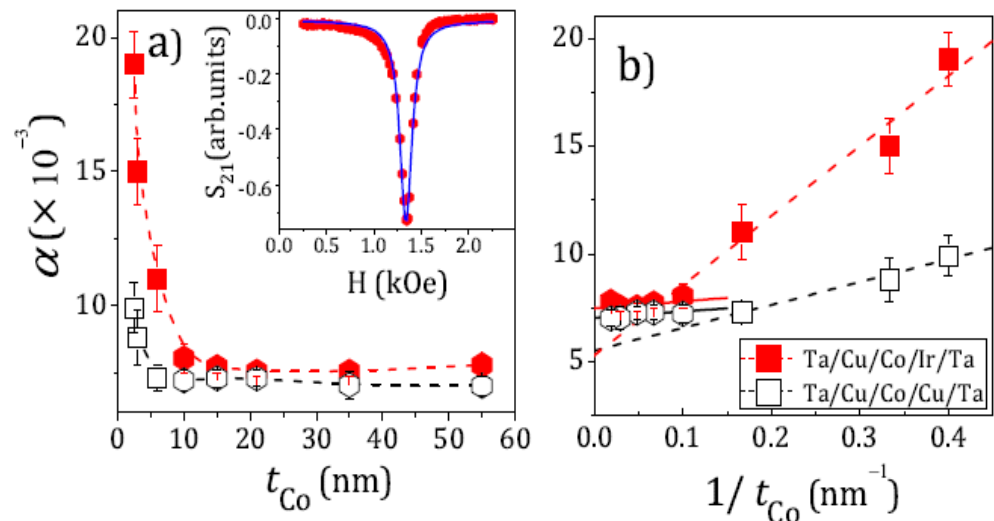
В залежності від товщини шару Co, його кристалічна структура змінюється з гцк (111) на гпу (0001). Ефективна намагніченість та фактор спектроскопічного розщеплення  $g$  для товстих (гпу) і тонких (гцк) плівок Co суттєво відрізняються.

Для товщин Co більше 6 нм затухання слабо залежить від матеріалу немагнітного шару, в той час як для товщин Co менше 6 нм для системи Ir/Co/Ir в порівнянні із системою Cu/Co/Cu затухання збільшується. Динаміка намагніченості тонких плівок Co також залежить від локальної кристалічної структури феромагнітного шару поблизу границі з немагнітним шаром.

Phys. Rev. Lett. 115, 056601 (2015).



(а) Залежність ефективного поля розмагнічування від зворотної товщини Co. На вставці показано приклад залежності резонансної частоти від магнітного поля для зразка Co[55 нм]/Ir; (б) Залежність g-фактору від зворотної товщини Co. Суцільна (штрихова) лінія являє собою типову лінійну підгонку товщини, яка більше (менше) 6 нм.

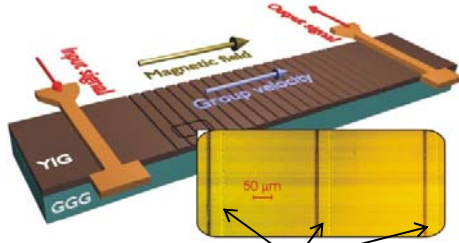


а) параметр затухання  $\alpha$  в залежності від товщини Co для плівок Co/Cu і Co/Ir. Пунктирна лінія - орієнтир для ока. Вставка - залежність мікровхвильового поглинання від магнітного поля на 15 ГГц для зразка Co [55 нм]/Ir; б) Залежність  $\alpha$  від зворотної товщини для обох наборів плівок. Суцільна і пунктирна лінії відповідають структурам з різною домінуючою кристалічною фазою Co: ГЦК та ГПУ.

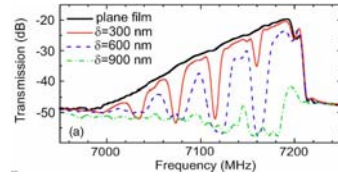


# Магنونні кристали

## Статичний кристал жолобкового типу на базі епітаксiальної пiвкки ЗiГ (YIG, $Y_3Fe_5O_{12}$ )

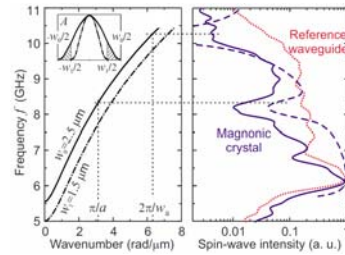
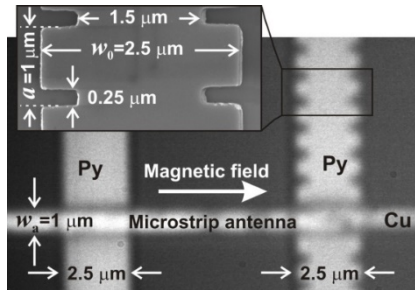


Жолобки глибиною  $\delta$ , витравленi на поверхнi пiвкки



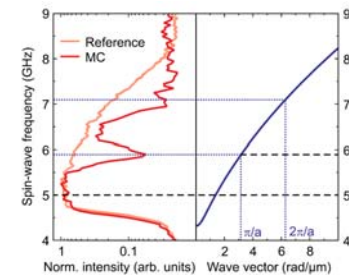
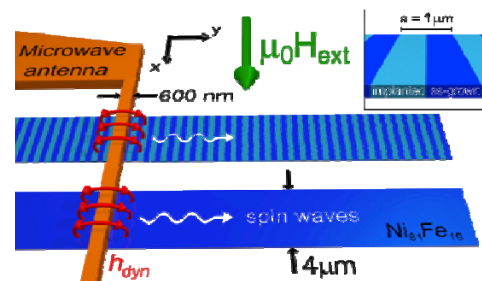
Appl. Phys. Lett. **93**, 022508 (2008)  
Appl. Phys. Lett. **94**, 172511 (2009)  
J. Appl. Phys. **105**, 083906 (2009)

## Мiкророзмiрний модульований по ширинi кристал на базi пермалоєвої (Py, $Ni_{81}Fe_{19}$ ) пiвкки



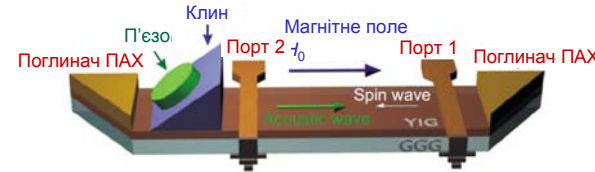
Appl. Phys. Lett. **95**, 262508 (2009)  
J. Phys. D: Appl. Phys. **45**, 255002 (2012)

## Ионно-имплантований мiкророзмiрний пермалоєвий кристал



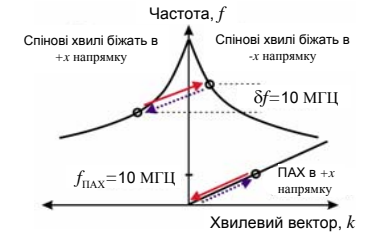
Phys. Rev. B **88**, 134406 (2013)  
Appl. Phys. Lett. **102**, 202403 (2013)

## Рухомий кристал, утворений поверхневою акустичною хвилею в пiвкцi ЗiГ



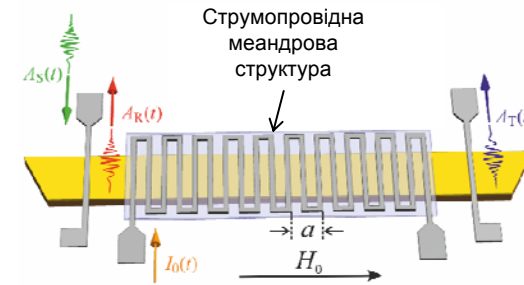
Червонi стрiлки на дисперсiйних залежностях позначають брегiвське розсiяння зворотної об'ємної магнiтостатичної спiнової хвилi на супутнiй поверхневiй акустичнiй хвилi (ПАХ) зi зростанням частоти розсiяної хвилi. Синi пунктирнi стрiлки показують розсiяння на зустрiчнiй акустичнiй хвилi зi зменшенням частоти розсiяної спiнової хвилi.

## Обернений ефект Допплера

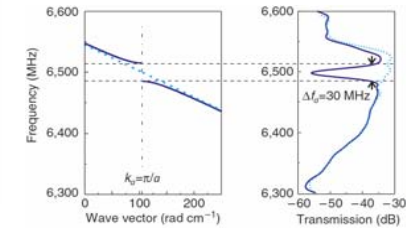


Phys. Rev. B **81**, 140404(R) (2010)

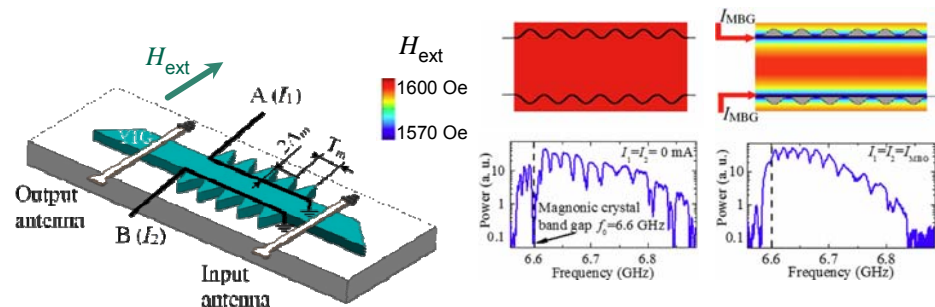
## Динамiчний кристал, утворений в пiвкцi ЗiГ просторово-модульованим магнiтним полем



J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 205005 (2009)  
Nat. Commun. **1**, 141 (2010)  
Phys. Rev. Lett. **108**, 015505 (2012)



## Динамiчний кристал на базi модульованої по ширинi пiвкки ЗiГ



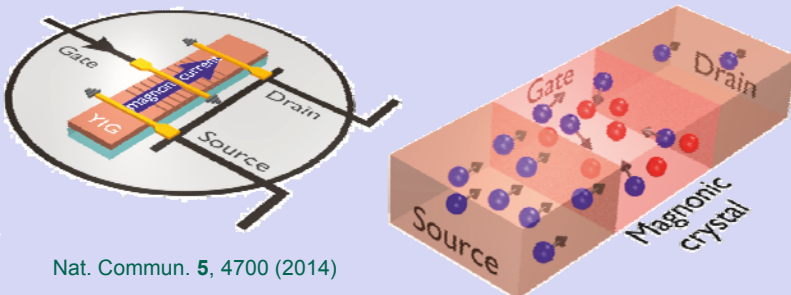
Appl. Phys. Lett. **106**, 102405 (2015)

# Магنونний транзистор та його застосування в пристроях спін-хвильової логіки

Обробка цифрової інформації з використанням спінових-хвиль становить одну з головних цілей сучасної магنونіки [Nature Phys. 11, 453 (2015)]. Недолік багатьох запропонованих на даний момент спін-хвильових логічних пристроїв полягає в тому, що вони не можуть бути з'єднані один з одним в логічну схему без попереднього перетворення надвисокочастотного спін-хвильового сигналу в імпульс постійного струму та навпаки.

## Магنونний транзистор на базі магنونного кристала

Представлено магنونний транзистор, в якому **магنونні струми керують магنونними струмами**. В цьому пристрої густина магنونного струму, що протікає від виточу (Source) до стоку (Drain) (сині кулі), контролюється магнонами, інжекттованими в затвор (Gate) транзистора (червоні кулі).

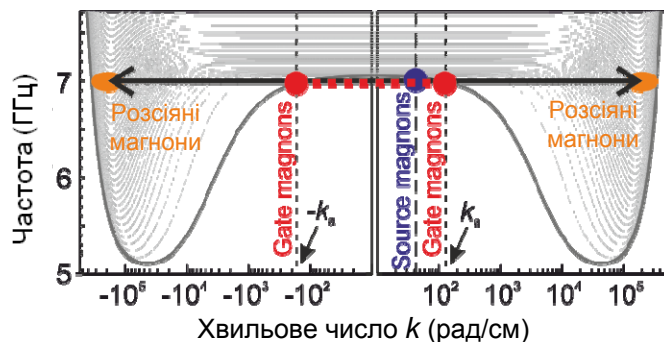


Nat. Commun. 5, 4700 (2014)

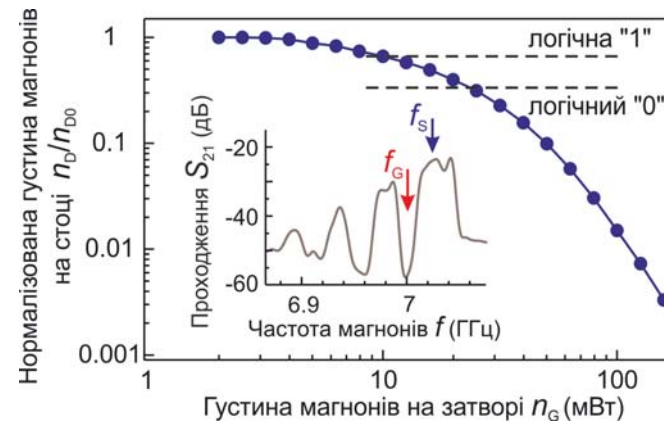
Жолобковий кристал на основі півки ЗІГ, працюючий з зворотними об'ємними хвилями, використано для збільшення густини магنونів на затворі та, відповідно, підвищення ефективності нелінійного чотирьох-магنونного роз-сі-ю-ван-ня, яке подавляє магنونний струм (спінову хвилю) протікаючий від стоку до виточу транзистора.

## Схема нелінійного магنون-магنونного розсіювання

Спектр диполь-обмінних спінових хвиль



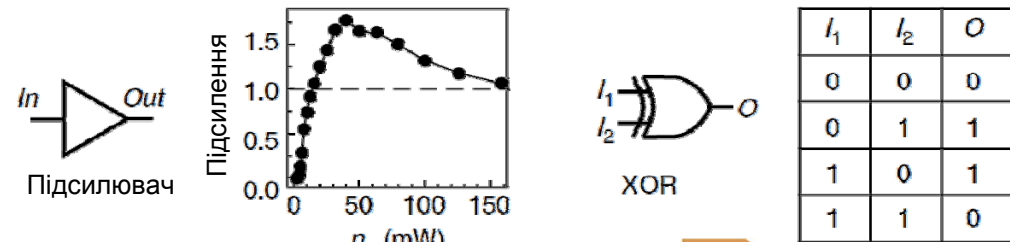
## Подавлення магنونного струму на стоці транзистора



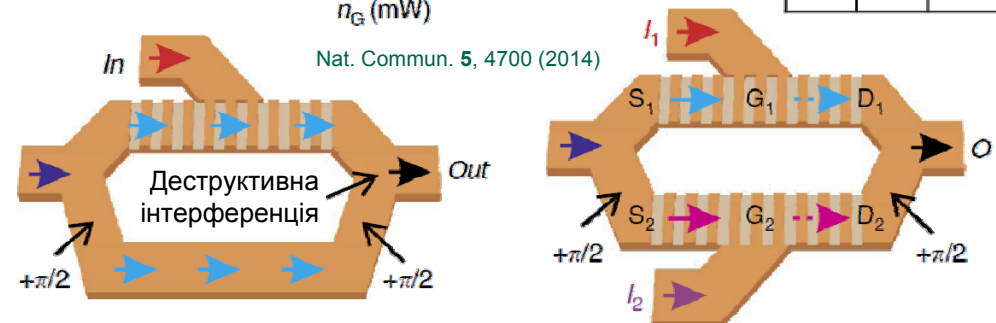
На вставці показано передаточну характеристику магنونного кристала та частоти сигналів на затворі  $f_G$  та на виточі  $f_S$  транзистора

Частота сигналу на затворі  $f_G$  знаходиться в забороненій смузі магنونного кристала, що забезпечує ефективне накопичення енергії керуючої спінової хвилі та унеможливує її поширення до входу та виходу пристрою.

## Підсилювач та логічний вентиль на базі магنونного транзистора

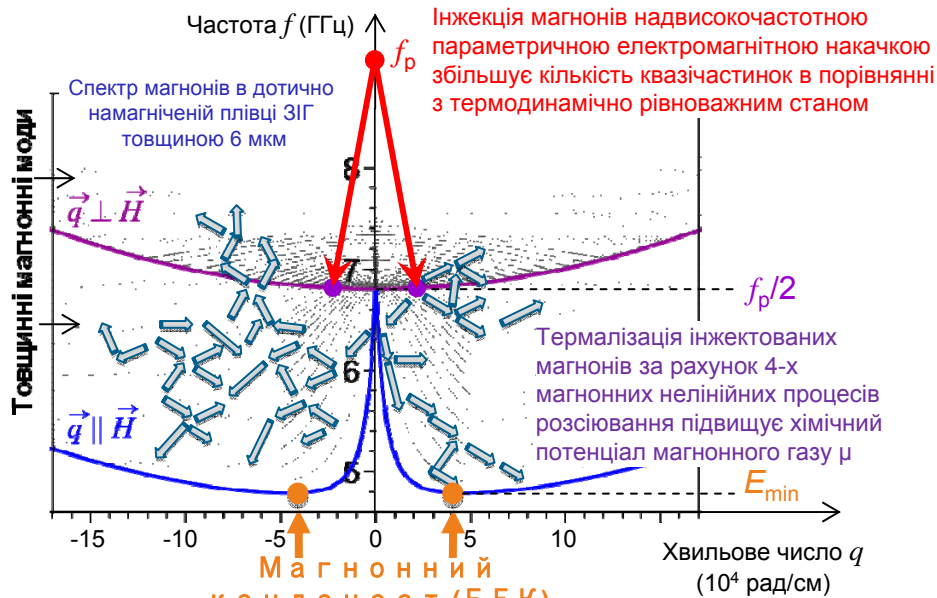


Nat. Commun. 5, 4700 (2014)



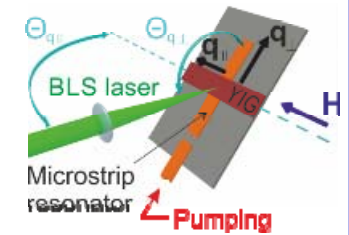
# Конденсація в магнонному газі при параметричній накачці

## Схема формування магнонного конденсату



## Метод спостереження

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

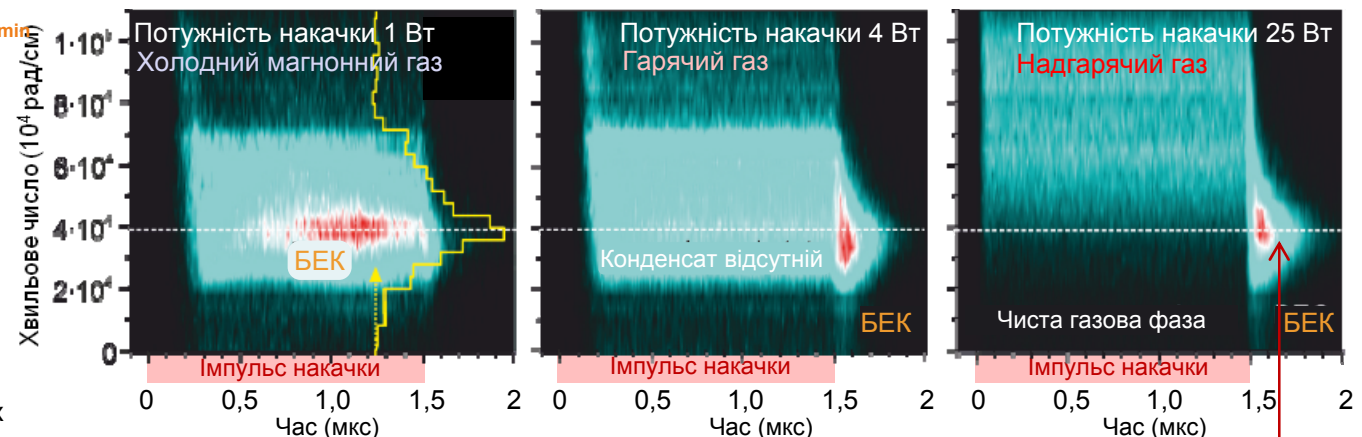


- Відкрито Бозе-Ейнштейнівську конденсацію в параметрично накачаному газі магнів при кімнатній температурі  
Nature **443**, 430 (2006)
- Досліджено процеси термалізації параметрично накачених магнів на шляху до формування магнонного конденсату  
Phys. Rev. Lett. **99**, 037205 (2007)  
Phys. Rev. Lett. **101**, 257201 (2008)  
Phys. Rev. B **91**, 220402(R) (2015)
- Підтверджено когерентний характер магнонного конденсату  
Phys. Rev. Lett. **100**, 047205 (2008)  
Appl. Phys. Lett. **92**, 162510 (2008)

## Бозе-Ейнштейнівська конденсація в надгарячому газі накачених магнів

- Отримано конденсацію в газі магнів, перегрітому параметричною накачкою, та досліджено супутні нерівноважні перехідні ефекти  
Nat. Commun. **5**, 4700 (2014)

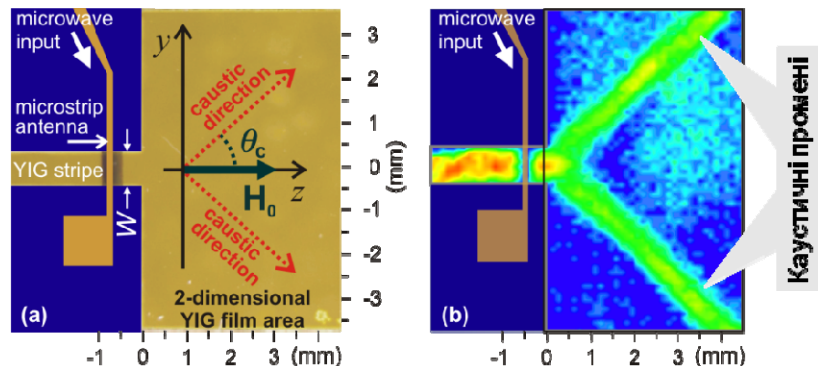
Зменшення температури магнонного газу в низько-енергетичній частині спін-хвильового спектру за рахунок «випаровування» високо-енергетичних магнів до вище лежачих спектральних областей відповідає за формування конденсату після вимкнення накачки



Розпорознені по короткохвильовій частині спектру магнони конденсуються в точці глобального енергетичного мінімуму

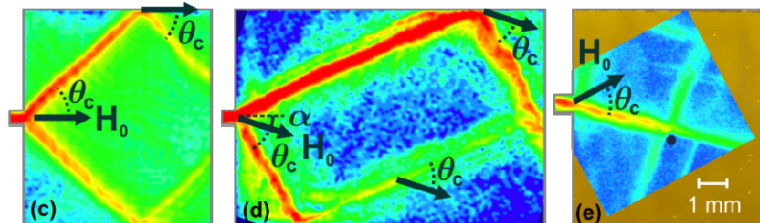
# Поширення спінових хвиль в магнітних функціональних матеріалах

Лінійне поширення спінових хвиль в середовищі з магнітною анізотропією: спін-хвильові каустики



Каустичні промені

Керування каустиками зміною орієнтації поля намагнічування  $H_0$

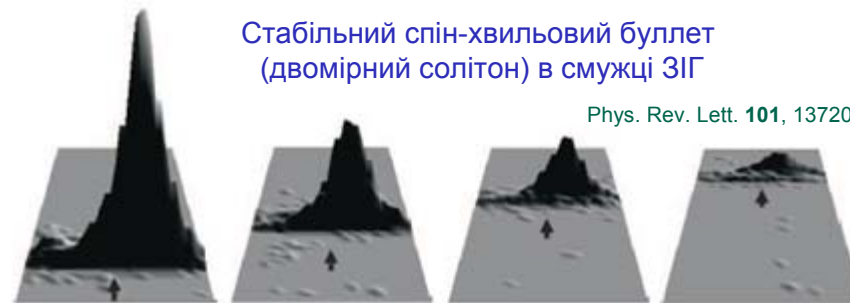


Phys. Rev. Lett. **104**, 197203 (2010)

Нелінійна динаміка: Спін-хвильові солітони та булети

Стабільний спін-хвильовий булет (двовірний солітон) в смужці ЗІГ

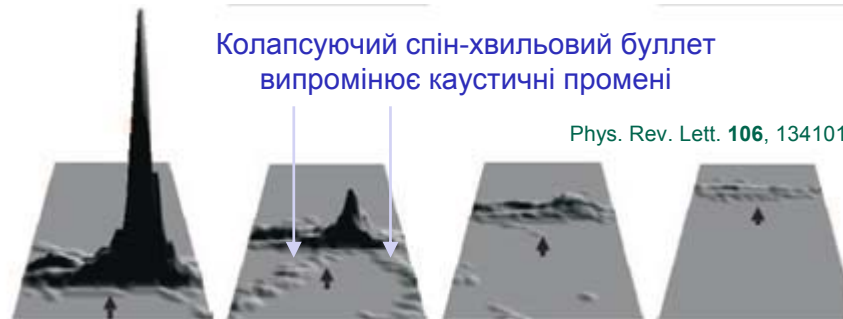
Phys. Rev. Lett. **101**, 137204 (2008)



Стрілка показує напрямок поширення хвильового пакета

Колапсуючий спін-хвильовий булет випромінює каустичні промені

Phys. Rev. Lett. **106**, 134101 (2011)



формування булета

колапсуючий булет

зруйнований булет

В функціональному магнітному матеріалі з зовнішньою контрольованою анізотропією – в дотично-намагнічених магнітних плівках – продемонстровано випромінювання лінійними (розкрив вузького спін-хвильового магнітного хвилеводу в двовірне середовище, дефект магнітного матеріалу) та нелінійними (колапсуючі булети, крайові моди магнітних хвилеводів) квазіточковими джерелами **бездифракційних спін-хвильових каустичних променів**

Вузькі в порівнянні з довжиною несучої хвилі, каустичні промені формуються в результаті співнапрявленого переносу енергії великою кількістю анізотропних хвиль з різними орієнтаціями хвильових векторів. Бездифракційний характер такого переносу призводить до збереження початкової ширини каустичних променів на сантиметрових і, в теорії, навіть на метрових дистанціях.

Будучи невід'ємною особливістю магнітного поширення за умов анізотропного спін-хвильового спектру, каустичні промені вивчаються в плівках ЗІГ, та таких функціональних матеріалах як металеві феромагнітні плівки та напівметалічні плівки Гейслера [PRL **110**, 067201] (2013)].

Дослідження спін-хвильових каустик дозволили зрозуміти особливості розсіювання спінових хвиль на стінках магнітних хвилеводів та на дефектах структури магнітних матеріалів, відкрили шлях до побудови новітніх пристроїв функціональної магнітоелектроніки та магнітоніки.