Магнетонаноелектроніка, стрейнтроніка та магнетокалорика інноваційних матеріалів для енергоефективних пристроїв і функціональних систем

робота, яка подається для участі у конкурсі на здобуття
Національної премії України
імені Бориса Патона 2025 року

Магнетонаноелектроніка, стрейнтроніка та магнетокалорика інноваційних матеріалів для енергоефективних пристроїв і функціональних систем

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ:

БАРАБАШ Максим Юрійович — доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу діагностики мезоскопічних систем Технічного центру НАН України;

ВЛАДИМИРСЬКИЙ Ігор Анатолійович — доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, директор Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України;

ГОЛУБ Володимир Олегович — доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу теорії магнітних явищ та магнітної динаміки конденсованих середовищ Інституту магнетизму імені В.Г. Бар'яхтара НАН України;

ЛІЗУНОВ Вячеслав Вячеславович — доктор фізико-математичних наук, професор, заступник директора Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України;

МІНІЦЬКИЙ Анатолій Вячеславович — доктор технічних наук, професор, перший заступник директора Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України;

РАДЧЕНКО Тарас Михайлович — доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу теорії металічного стану Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України;

ТОВСТОЛИТКІН Олександр Іванович — доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту магнетизму імені В.Г. Бар'яхтара НАН України;

ШЕВЧЕНКО Андрій Борисович — доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу теорії металічного стану Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

КІЛЬКІСТЬ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА РОБОТОЮ: **5** монографій (**3** — у зарубіжних виданнях),
5 розділів у колективних монографіях зарубіжних видавництв,
1 навчальний посібник,
123 статті в журналах, включених до категорії «А» (**105** — у зарубіжних виданнях),
та **1** стаття у журналі категорії «Б».
Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс **за роботою**
згідно з наукометричними базами даних складає відповідно:
Web of Science **2928/26**,
Scopus **3351/29**,
Google Scholar **4124/32**.
Отримано **6** патентів на винахід (корисну модель) України.
За результатами досліджень авторами та за їхнього керівництва (консультування) захищено **8** докторських і **8** кандидатських дисертацій.

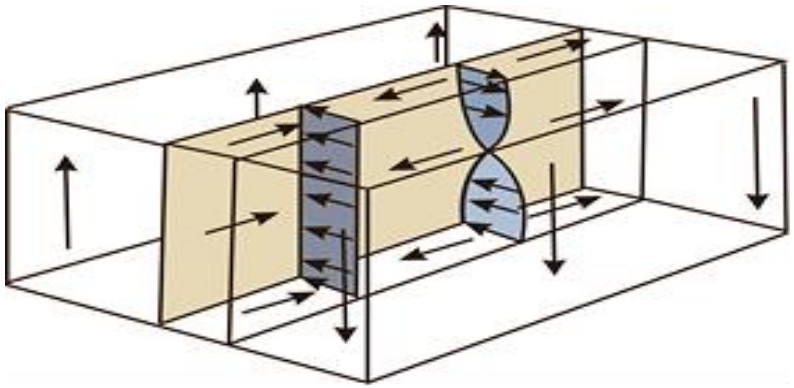
ЗАГАЛЬНА КІЛЬКІСТЬ ПОСИЛАНЬ НА ВСІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРІВ/Н-ІНДЕКС ЗА ОСТАННІ 5 РОКІВ:

№	Виконавець	Scopus	Web of Science	Google Scholar
1	**БАРАБАШ Максим**	**112/4**	**19/3**	**147/5**
2	**ВЛАДИМИРСЬКИЙ Ігор**	**178/4**	**87/3**	**241/5**
3	**ГОЛУБ Володимир**	**492/3**	**33/4**	**636/3**
4	**ЛІЗУНОВ Вячеслав**	**172/5**	**53/5**	**137/6**
5	**МІНІЦЬКИЙ Анатолій**	**30/3**	**12/2**	**58/4**
6	**РАДЧЕНКО Тарас**	**687/7**	**118/6**	**608/10**
7	**ТОВСТОЛИТКІН Олександр**	**663/5**	**53/5**	**852/8**
8	**ШЕВЧЕНКО Андрій**	**108/4**	**17/3**	**111/5**

КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ МАГНЕТНИХ СОЛІТОНІВ У ПЛІВКАХ ІЗ СИЛЬНОЮ ОДНОВІСНОЮ МАГНЕТНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ

З використанням формалізму Вентцеля–Крамерса–Бріллюена для магнетних “kink”- і нуль-солітонів (вертикальна Блохова лінія та Блохова точка) у тонких феромагнетних плівках із сильною магнетною анізотропією передбачено квантові ефекти:

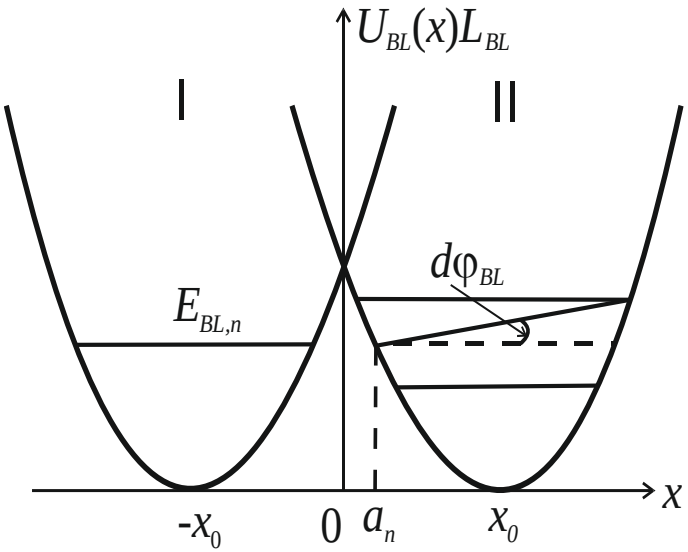
- надбар’єрне відбивання Блохової точки;
- тунелювання через дефект вертикальної Блохової лінії та Блохової точки;
- квантові осциляції вертикальної Блохової лінії та Блохової точки у доменних стінках магнетних доменів (циліндричного, смугового);
- підбар’єрне проходження (квантове зіткнення) один через одного двох вертикальних Блохових ліній однакового топологічного заряду в доменній стінці смугового магнетного домену.



Доменна стінка в одновісній феромагнетній плівці, яка містить наномасштабні субструктурні елементи: дві вертикальні Блохові лінії (виділені **сірим** кольором). Одну з вертикальних Блохових ліній розділено в центрі Блоховою точкою на два сеґменти із протилежними топологічними зарядами.

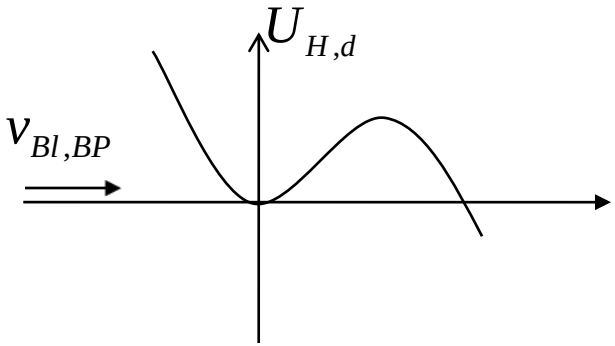
Потенціальні бар’єри, що утворюються у доменних стінках одновісних магнетних плівок, за яких відбуваються квантові ефекти, властиві магнетним “kink”- і нуль-солітонам

Потенціальний бар’єр, утворений потенціальними ямами I і II, у яких мають місце квантові осциляції пари солітонів типу “kink” одного топологічного заряду. Процес тунелювання “один через одного” відбувається між потенціальними ямами із рівня ями I на підрівень такого ж рівня ями II $E_{BL,n}$

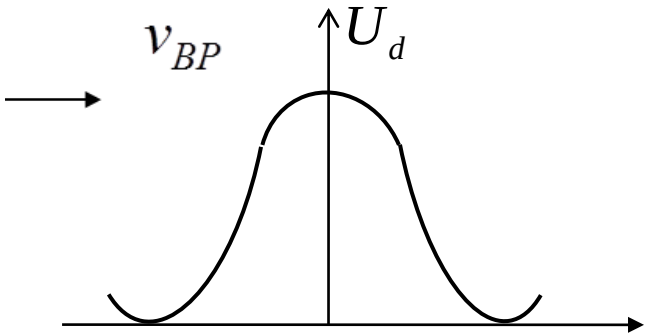


Передбачено можливість підбар’єрного проходження “один через одного” двох магнетних солітонів типу “kink” одного топологічного заряду, яких зближують сталим магнетним полем у доменній стінці смугового магнетного домену.
Ефект має місце за магнетних полів, близьких до поля колапсу солітонів.

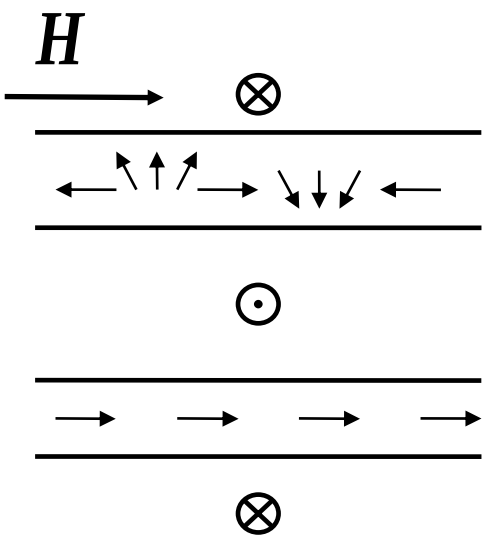
Потенціальний бар’єр, утворений полем дефекту та зовнішнім магнетним полем, через який відбувається тунелювання магнетних “kink”- та нуль-солітонів.



Блохова точка, на відміну від вертикальної Блохової лінії, проходить цілком крізь потенціальний бар’єр. Потенціальний бар’єр, утворений полем дефекту, який зумовлює надбар’єрне відбивання Блохової точки у доменній стінці одновісної магнетної плівки.



Квантові осциляції пари солітонів типу “kink” одного топологічного заряду у вигляді вертикальних Блохових ліній у доменній стінці смугового магнетного домену



Фраґмент смугового магнетного домену (вид зверху), одна з доменних стінок якого (верхня на рисунку) містить пару солітонів типу “kink” одного топологічного заряду (оберт векторів намагнетованості відбувається в одному напрямку).

$$E_{BL} = \hbar\omega_{BL}\left(n + 1/2\right) \qquad \omega_{BL} \cong 10^{8} - 10^{9}\ \text{c}^{-1}$$

$$w_n = \frac{1}{n!} e^{-\tilde{n}} \tilde{n}^{n}$$ — ймовірність збурення n-го квантового рівня визначається Пуассоновим розподілом

$$\tilde{n} = \frac{W_H}{(2\hbar\omega_{BL}})$$ — кількість збурених магнетним полем квантів

W_H — енергія взаємодії вертикальної Блохової лінії з магнетним полем H

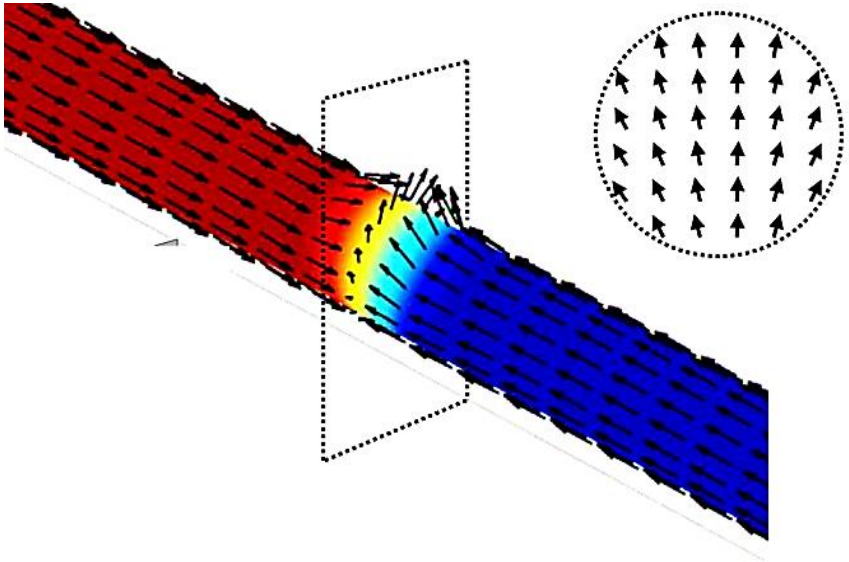
Квантові осциляції мають місце за величин магнетних полів

$$h >> 10^{-4},\ h = H/(8M),\quad M \text{ — намагнетованість плівки}$$

Характерна температура квантового процесу $\cong 10^{-22} - 1\ \text{K}$

Визначено фізичні передумови створення комірки пам’яті гібридного типу “біт+кубіт” на одному фізичному носії — парі вертикальних Блохових ліній одного топологічного заряду у доменній стінці смугового магнетного домену. Надщільний запам’ятовувальний пристрій на основі такої комірки має стати чільною частиною перспективних дата-центрів — ключової інфраструктури підтримки штучного інтелекту.

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ФЕРОМАГНЕТНОГО НАНОДРОТУ, МАГНЕТНА СТРУКТУРА ЯКОГО ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ ПОПЕРЕЧНОЮ ДОМЕННОЮ СТІНКОЮ



Нанодріт, що містить в центрі магнетний солітон типу “kink” у вигляді поперечної доменної стінки (стрілочками зазначено напрямок вектору намагнетованості всередині солітона).

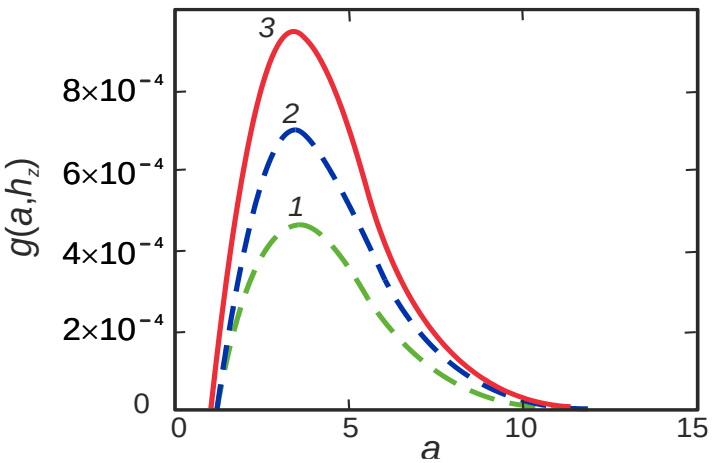
Передбачено фізичні механізми збільшення впливу теплового руху доменної стінки:

- пропорційне збільшення довжини нанодроту та кількості доменних стінок;
- використання часткових петель гістерезису нанодроту.

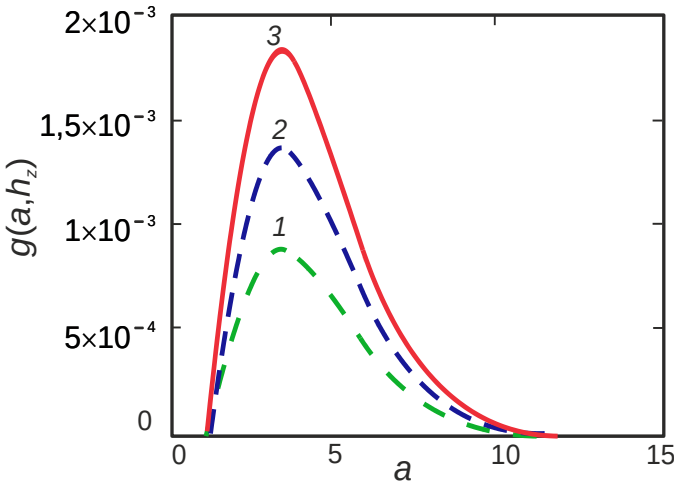
Визначено, що ентропійний і теплоємнісний внески, зумовлені тепловим рухом доменної стінки, можуть бути одного порядку з аналогічними термодинамічними характеристиками складових підсистем феромагнетних нанодротів: магнонної, фононної й електронної (для нанодротів, які є провідними).

Одержані результати уможливлюють шляхом варіювання параметрів нанодроту (масштабу, намагнетованості, кількості доменних стінок) керувати його термодинамічними властивостями.

Магнетокалоричний ефект у циліндричному феромагнетному нанодроті з поперечною доменною стінкою



Температурні залежності магнетної ентропії $g(a,h_z) = -c_{v,h}/(dh/dT) > 0$ (за різних значень магнетного поля *h*) нікелевого нанодроту з діаметром *d* = 1 нм: 1 – *h* = 0,1; 2 – *h* = 0,15; 3 – *h* = 0,2.



Температурні залежності магнетної ентропії $g(a,h_z) = -c_{v,h}/(dh/dT) > 0$ (за різних значень магнетного поля *h*) залізного нанодроту з діаметром *d* = 1 нм: 1 – *h* = 0,1; 2 – *h* = 0,15; 3 – *h* = 0,2.

Аналіз наведених зележностей свідчить, що існує температурний інтервал, на якому $g(a,h_z) > 0$. Це означає, що $dh/dT < 0$, тобто в системі відбувається неґативний магнетокалоричний ефект. За відсутності у нанодроті доменної стінки має місце слабкіший за неґативний, позитивний магнетокалоричний ефект.

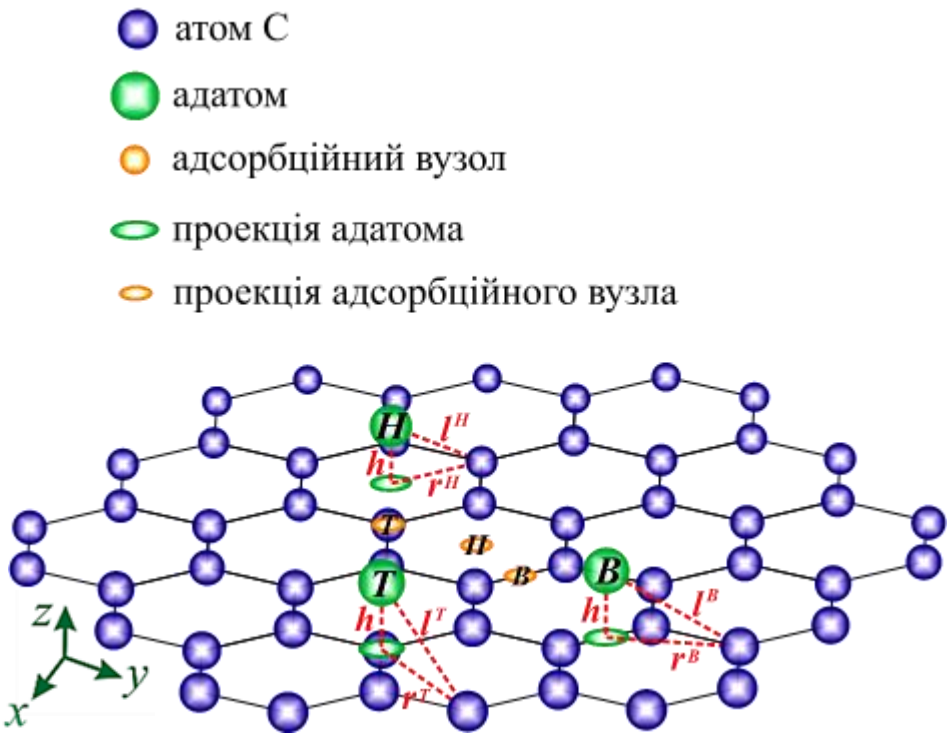
Передбачено можливість за допомоги магнетокалоричного ефекту змінювати температуру компакту із 10^3–10^4 залізних (нікелевих) нанодротів на 1 К, що уможливлює через застосування серії таких компактів досягати заданого збільшення (зменшення за зворотньої зміни магнетного поля) початкової температури взаємодійного із нанодротами середовища. **Даний результат забезпечує практичний інтерес, зокрема в онкології для розробки нових гіпертермічних методів знищення ракових клітин злоякісних пухлин.**

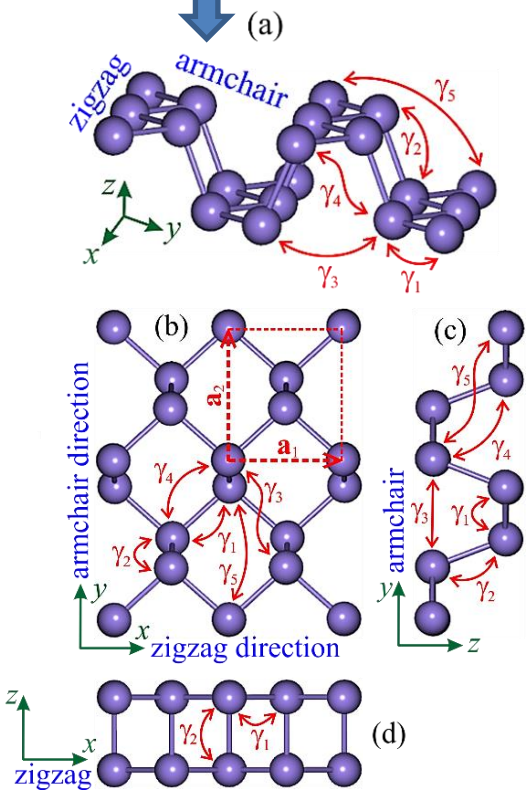
РЕҐУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ СТРУКТУРИ ТА ЗАРЯДОВОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ У ГРАФЕНОВИХ І ФОСФОРЕНОВИХ МАТЕРІАЛАХ РОЗПОДІЛОМ ЇХНІХ ДЕФЕКТІВ У ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ТА ЗОВНІШНЬОМУ МАГНЕТНОМУ ПОЛЯХ

Стрейнтроніка: об’єкти дослідження

СТРУКТУРА

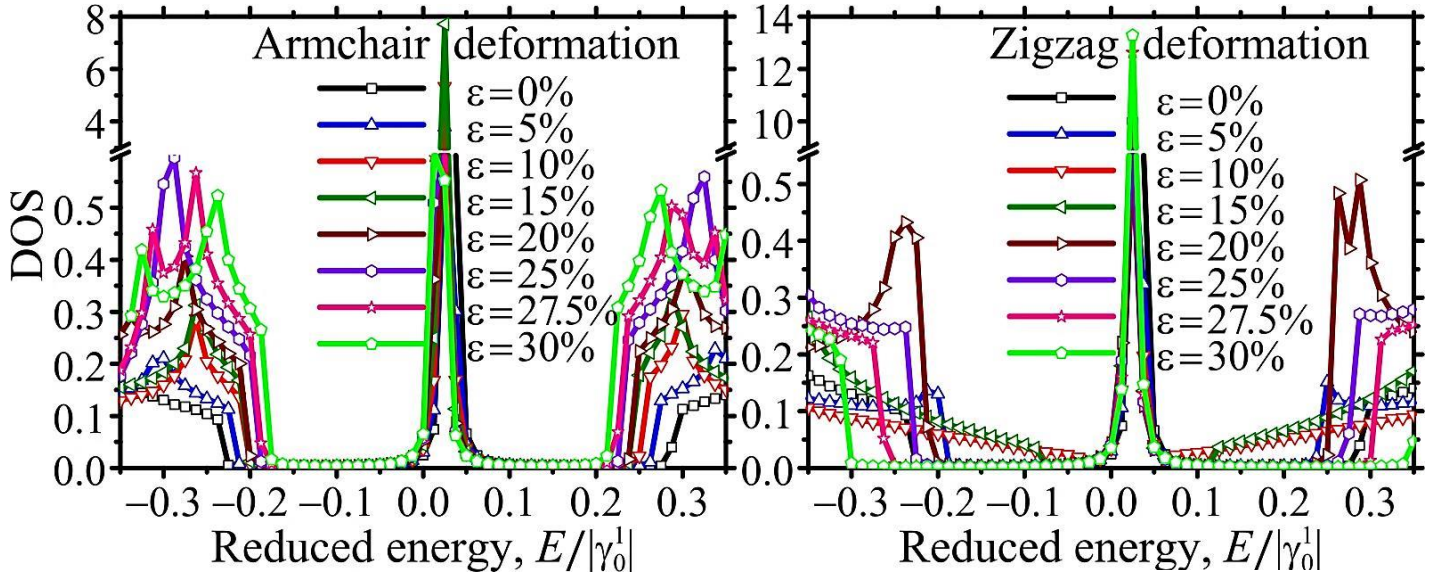
- **псевдоізотропна** → **графен**
- **анізотропна** → **фосфорен**

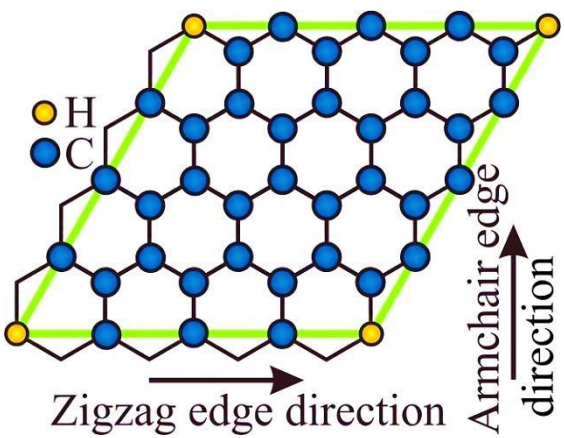


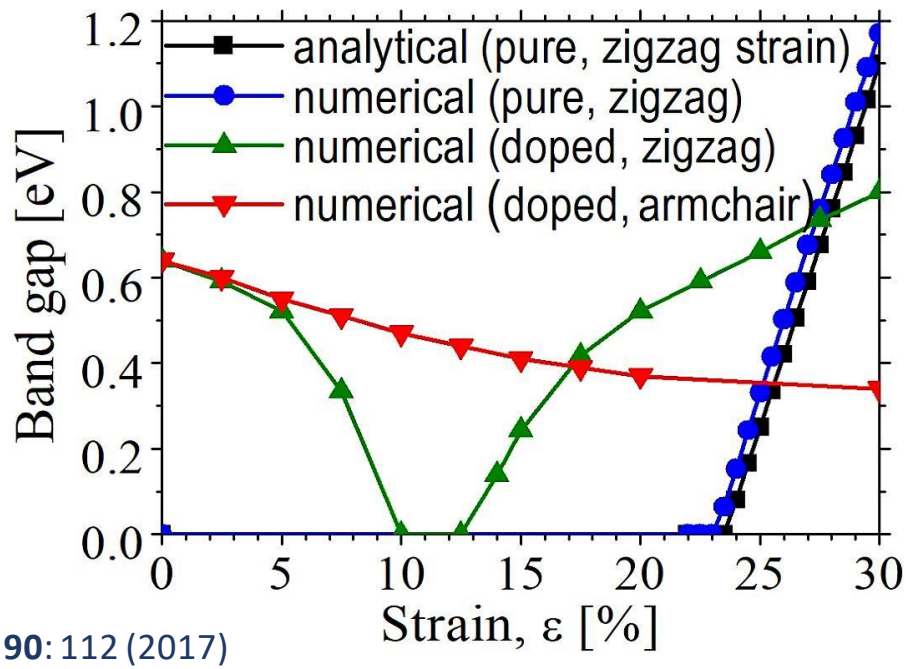


Стрейнтроніка в графені з дефектами: деформаційно залежні густина електронних станів і заборонена зона

3,125% (1/32) впорядкованих атомів домішки

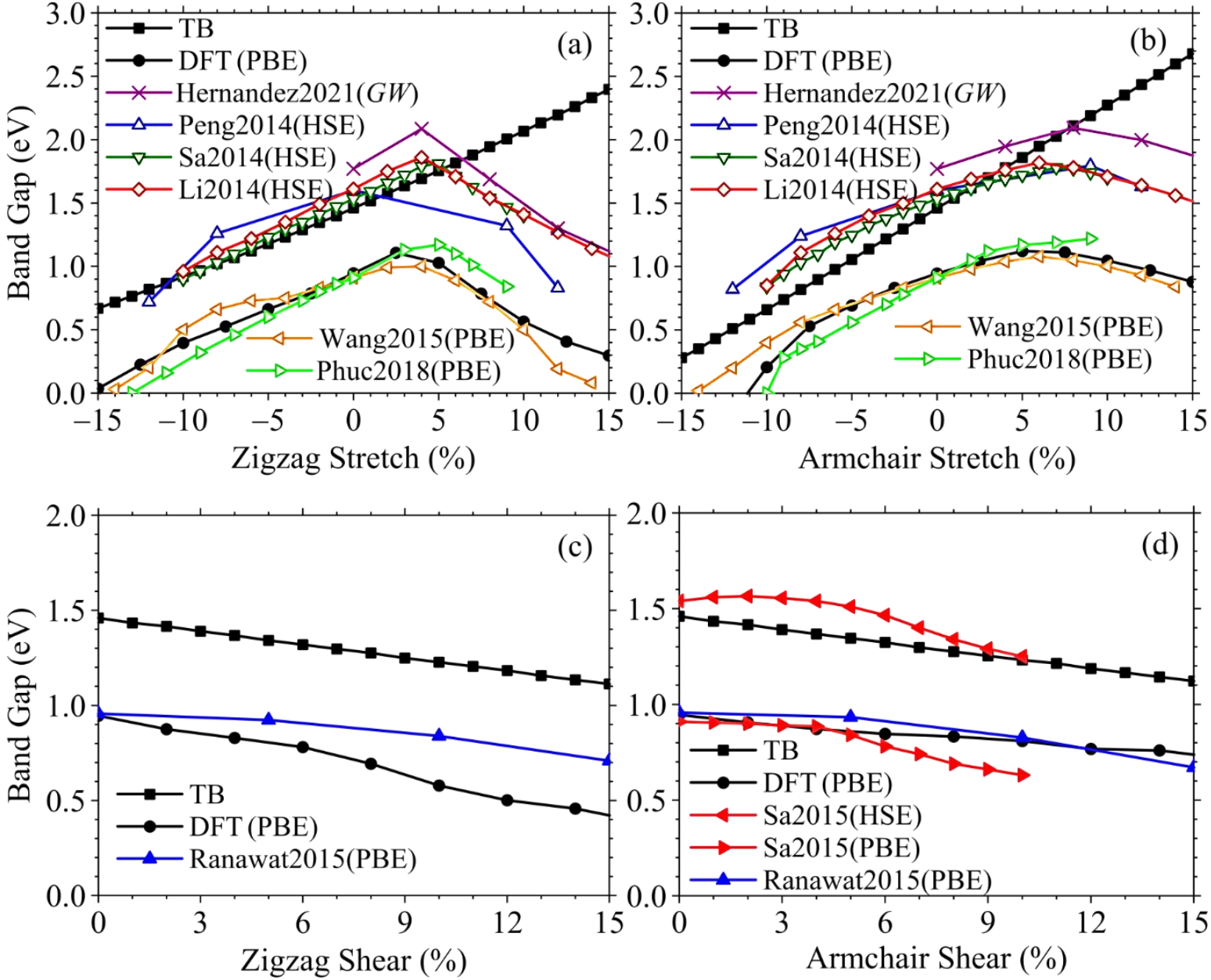






I.Yu. Sagalianov, T.M. Radchenko et al., Eur. Phys. J. B, **90**: 112 (2017)
T.M. Radchenko, V.A. Tatarenko, V.V. Lizunov et al., Phys. Status Solidi B, **256**: 1800406 (2019)

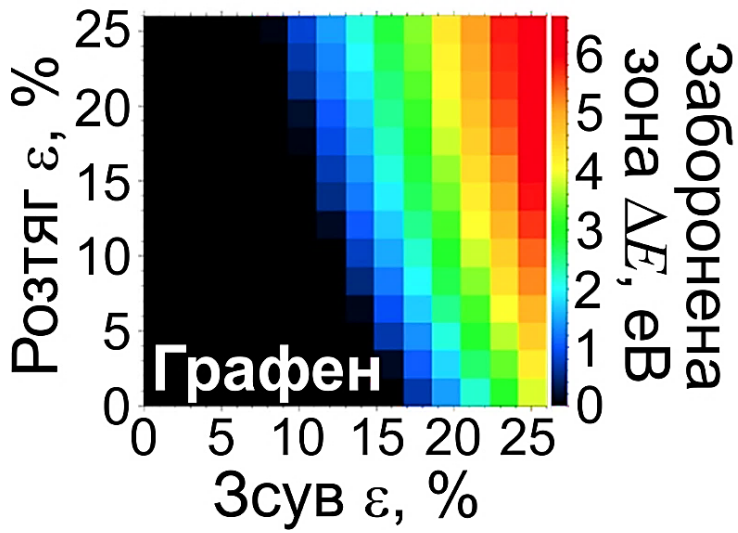
Стрейнтроніка фосфорену

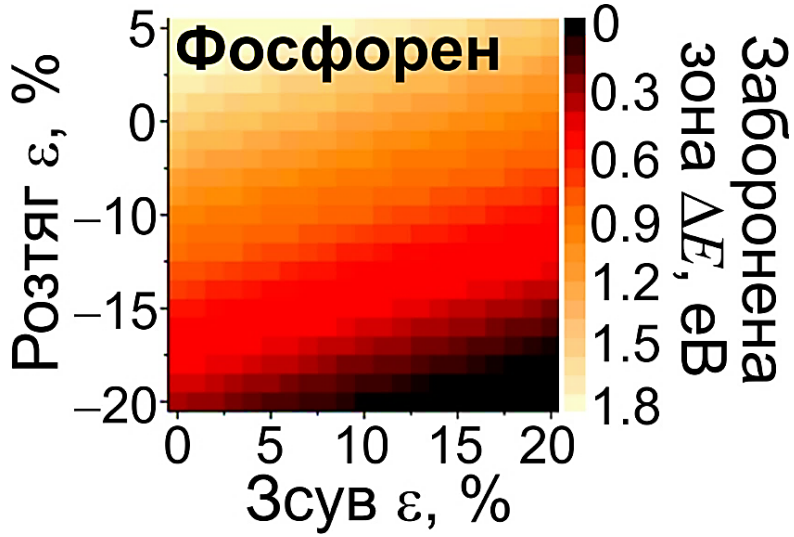


■, ● — наші розрахунки у порівнянні з іншими

A.G. Solomenko, I.Y. Sahalianov, T.M. Radchenko, V.A. Tatarenko, Molecular Crystals and Liquid Crystals **768 (9)**: 238–250 (2024)

Стрейнтроніка графену та фосфорену: вплив комбінованих деформацій на заборонену зону





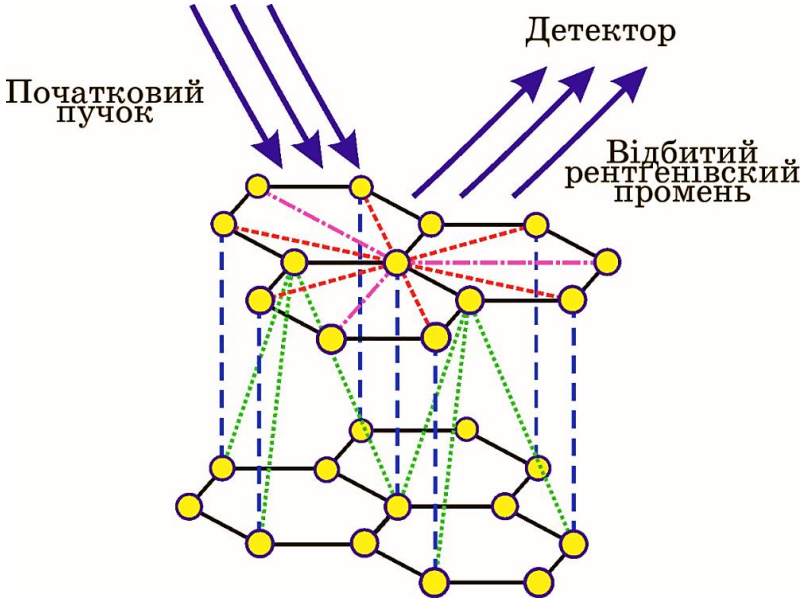
Неруйнівні деформації зсувом можуть спричиняти заборонену зону в графеновій електронній структурі до 3 еВ, а комбіновані деформації (зсув + розтяг) — аж до 6 еВ. Такі значення енергетичної щілини для графену істотно перевищують відповідні значення для кремнійових матеріалів.*

Для фосфорену ж одночасне накладання комбінованих деформацій (розтяг + зсув) істотно розширює заборонену зону: від нуля (металічний стан) аж до властивих широкозонним напівпровідникам значень. З накладанням комбінованих деформацій перетворення фосфорену з напівпровідникового стану в напівметалічний стається за меншої (цілковито неруйнівної) деформації, що сприяє розширенню його функціональних властивостей.**

* I.Yu. Sahalianov, T.M. Radchenko, V.A. Tatarenko et al. Journal of Applied Physics **126 (5)**: 054302-1–9 (2019)

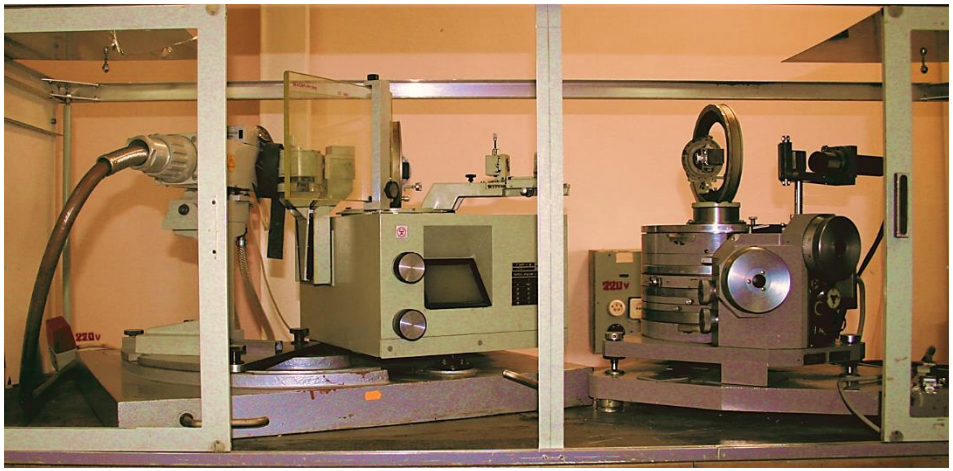
** A.G. Solomenko, I.Y. Sahalianov, T.M. Radchenko, V.A. Tatarenko, Scientific Reports **13**: 13444-1–12 (2023)

Динамічна дифрактометрія квазидвовимірних структур

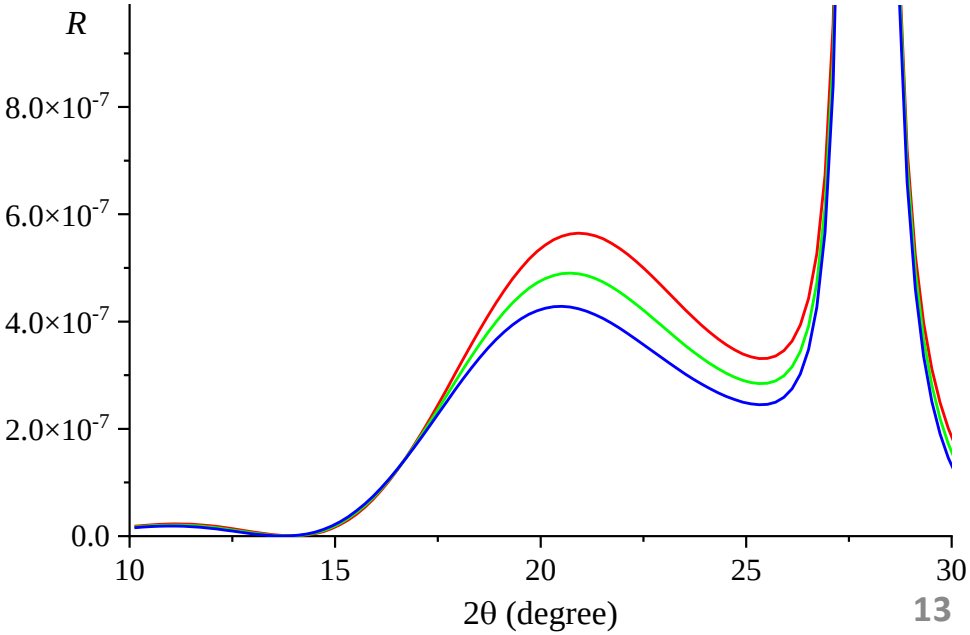


Геометрія дифракції рентґенового випромінення на кількашаровій графеновій плівці

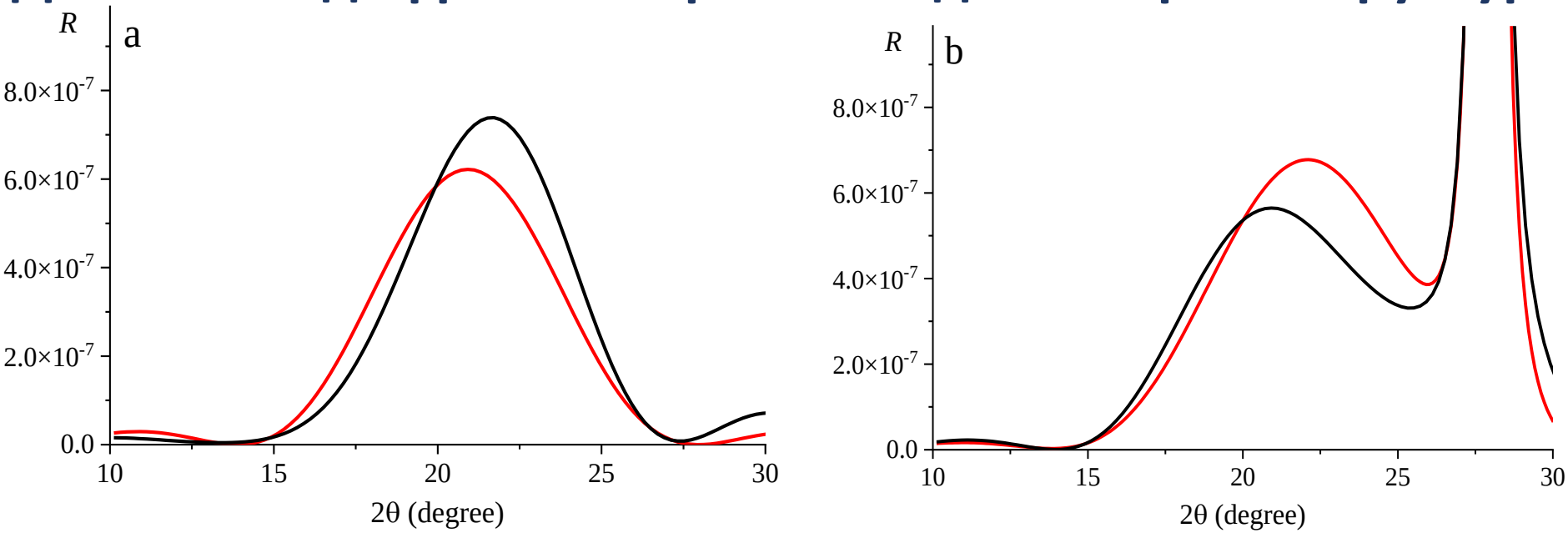
Дифрактометричний комплекс нового покоління, включений до Державного реєстру наукових об’єктів, що становлять національне надбання України



Криві відбивання 3-шарової графенової плівки на підкладинці з різними параметрами напруження графенових шарів: R = 0 (червона лінія), R = 0,5 (зелена лінія), R = 1 (синя лінія).



Динамічна дифрактометрія квазидвовимірних структур



Криві відбивання для графену (рефлекс (002), енергія випромінення — 10,2 кеВ) з урахуванням (чорні лінії) та без урахування (червоні лінії) наявности буферного шару: 3-шарова графенова плівка (a), 3-шарова графенова плівка на підкладинці (b).

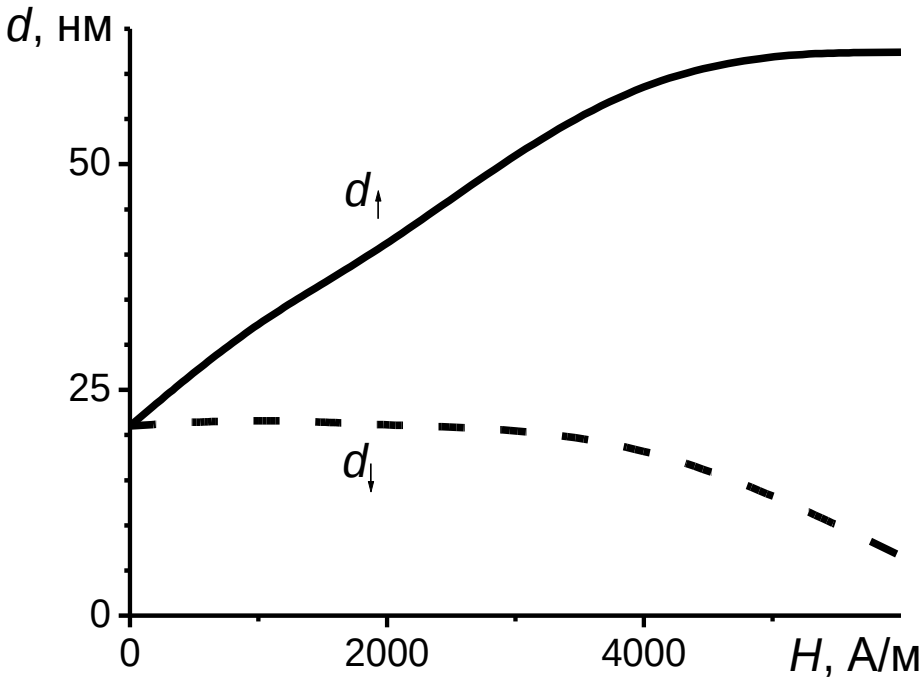
Встановлено особливості динамічної дифракції Рентґенових променів у випадку геометрії дифракції за Бреґґом на системі графенова плівка/підкладинка SiC. Продемонстровано необхідність врахування під час розгляду таких систем варіятивности параметра ґратниці кількашарової графенової плівки, а також впливу її товщини на тепловий фактор Дебая–Валлера.

Показано, що навіть невеликі зміни структурних характеристик системи графенова плівка/підкладинка, а також її деформованого стану приводять до істотної зміни дифракційного профілю, що уможливлює визначати зазначені параметри рентґенодифракційним методом.

Запропонований підхід дає змогу коректно описати дифракційні профілі структури графенова плівка/підкладинка в області Бреґґового піку від підкладинки через врахування впливу підкладинки та наявних у ній мікродефектів на картину розсіяння.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОН-ЕЛЕКТРОННИХ КОРЕЛЯЦІЙ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ І МАГНЕТНІ ВЛАСТИВОСТІ СТОПІВ ЗАМІЩЕННЯ ЯК ВДОСКОНАЛЕНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СПІНТРОННИХ МАТЕРІЯЛІВ

Залежність лінійних розмірів магнетних доменів, орієнтованих вздовж (d↑) і проти (d↓) зовнішнього магнетного поля від величини напруженості цього поля



$$1/2 = (P_{jl\ i0}^{\mu_\lambda^+/\mu_\lambda^+})^{k_\uparrow},$$

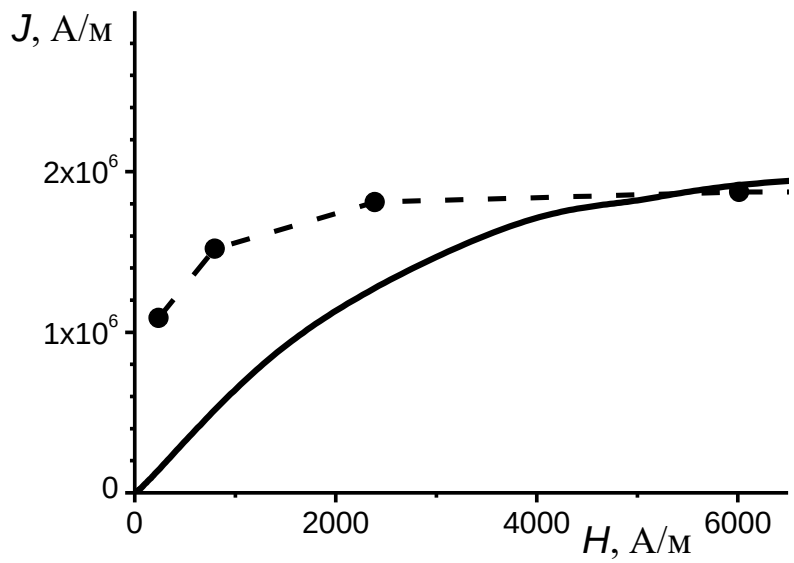
$$1/2 = (P_{jl\ i0}^{\mu_\lambda^-/\mu_\lambda^-})^{k_\downarrow}$$

$$d_\uparrow = 2ak_\uparrow,$$

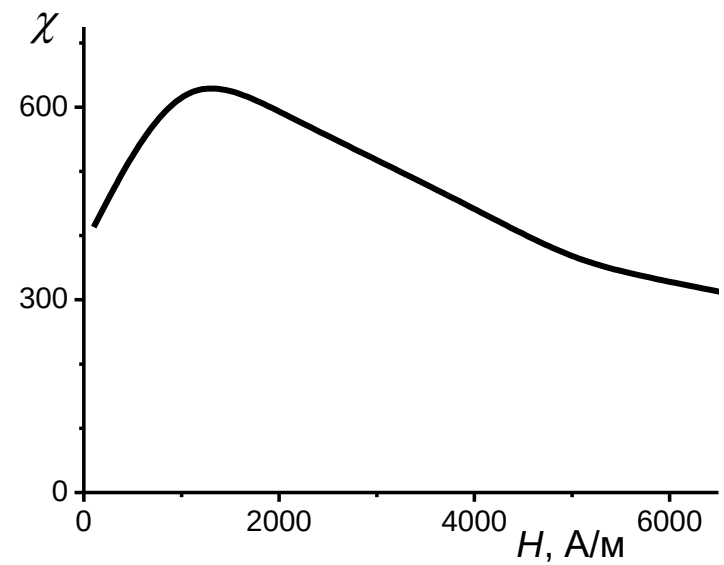
$$d_\downarrow = 2ak_\downarrow$$

Встановлено зв'язок між параметрами магнетування, зокрема лінійними розмірами магнетних доменів із намагнетованістю вздовж і проти зовнішнього магнетного поля, та електронною структурою стопів з вузькими енергетичними зонами.

Залежність намагнетованости та магнетної сприйнятливості стопу $Fe_{0,5}Co_{0,5}$ від напруженості зовнішнього магнетного поля



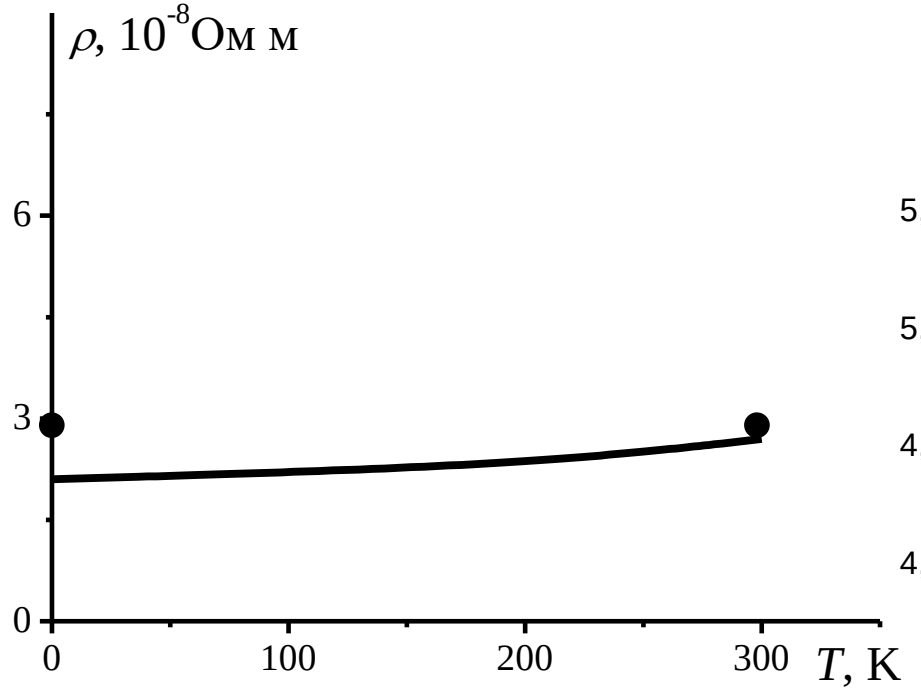
Залежність величини намагнетованости *J* стопу $\mathbf{Fe_{0,5}Co_{0,5}}$ від напруженості зовнішнього магнетного поля: результати розрахунку (—), експериментальні дані (•)



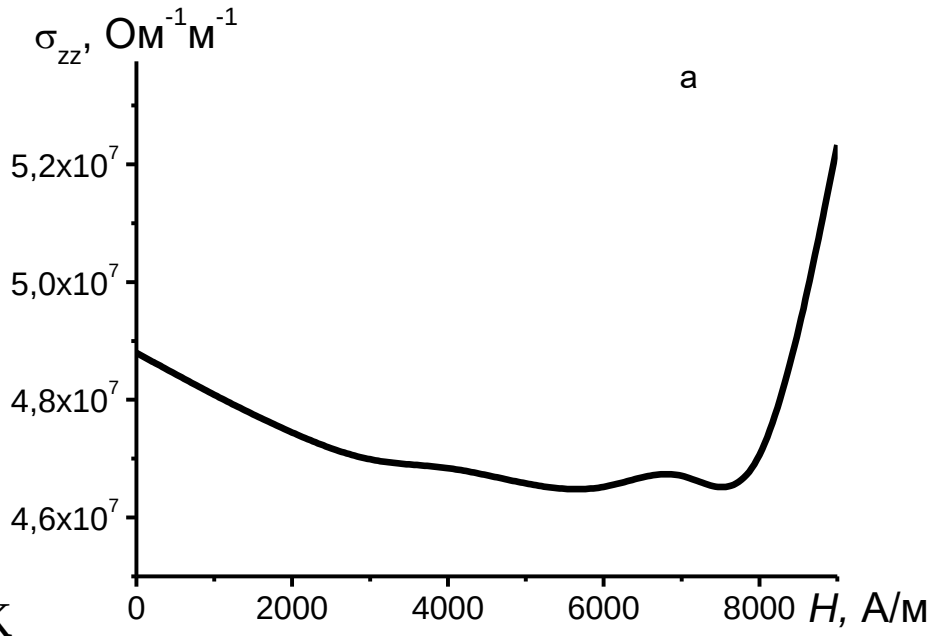
Залежність магнетної сприйнятливости χ стопу $\mathbf{Fe_{0,5}Co_{0,5}}$ від напруженості зовнішнього магнетного поля

Встановлено зв'язок між магнетними характеристиками та електронною структурою стопу $Fe_{0,5}Co_{0,5}$. Шляхом розрахунку енергетичного спектру електронів та мінімізації вільної енергії стопу по параметрах атомових і магнетних кореляцій досліджено механізм намагнетовування системи.

Дослідження електротранспортних властивостей стопу $Fe_{0,5}Co_{0,5}$



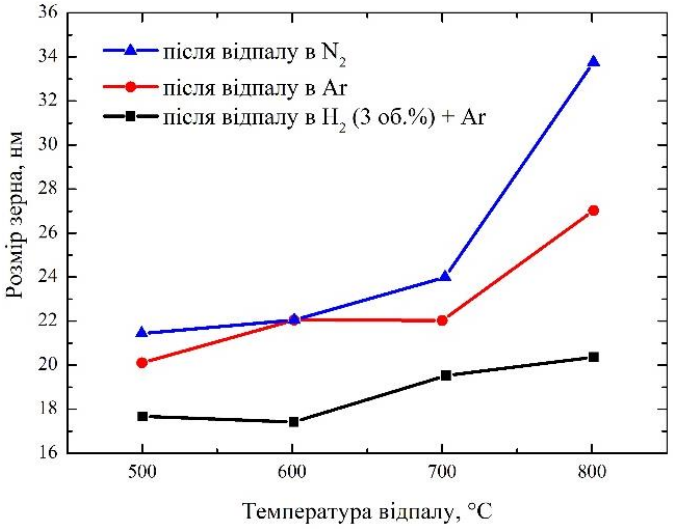
Температурна залежність електроопору ρ стопу

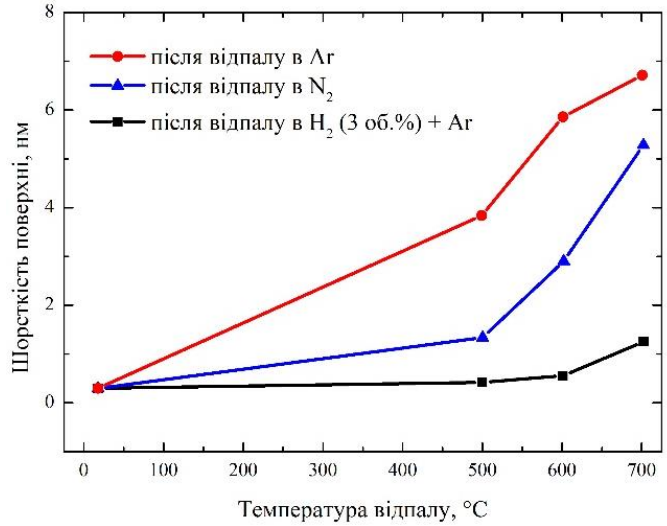


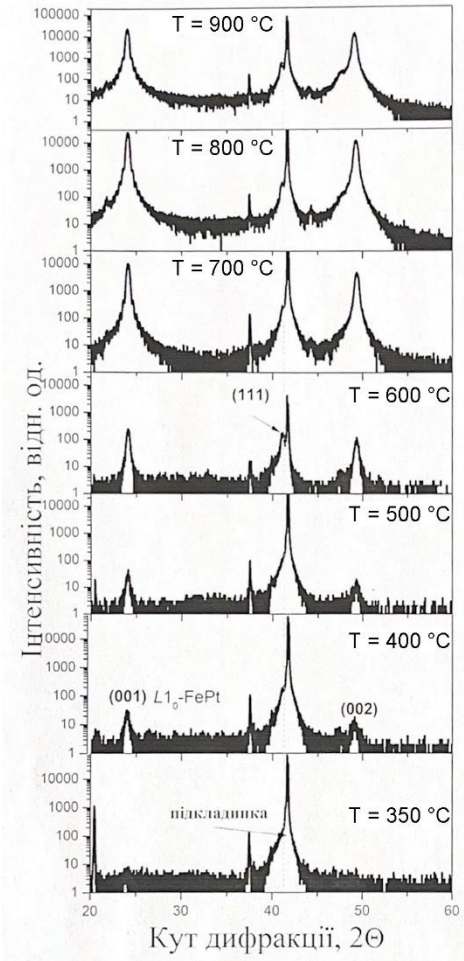
Залежність електропровідности стопу $\mathbf{Fe_{0,5}Co_{0,5}}$ від величини зовнішнього магнетного поля

Передбачено температурні залежності статичної електропровідності у стопах типу FeCo, які є конкурентними кандидатами в порівнянні з іншими високомагнетними матеріалами через їхню високу питому намагнетованість насичення, низьку коерцитивну силу, високу проникність і високу температуру Кюрі — властивості, які роблять їх корисними для застосування навіть за високих температур.

Вплив складу атмосфери термічного оброблення та типу монокристалічної підкладинки на формування структурно-фазових станів нанорозмірного феромагнетного матеріалу на основі FePt







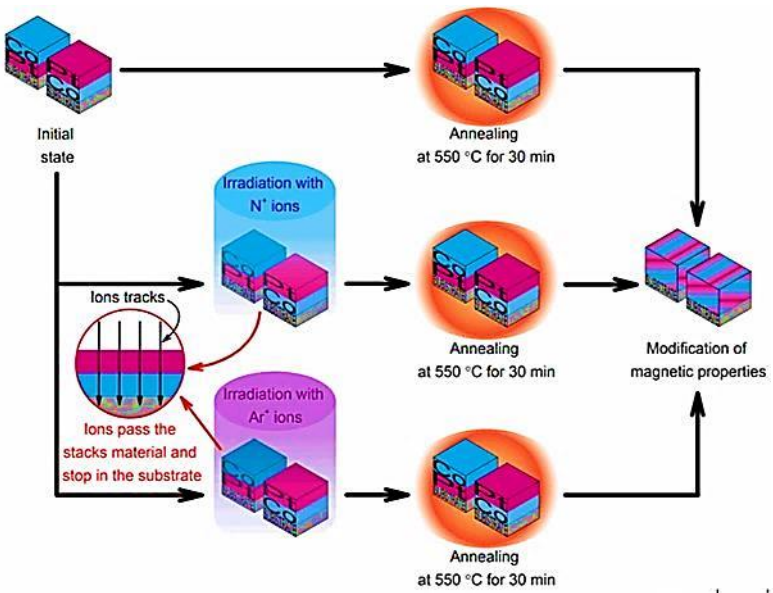
Термічна стабілізація розміру зерен та шорсткості поверхні нанорозмірного феромагнетного матеріалу FePt внаслідок додавання H_2 до нейтральної атмосфери відпалу

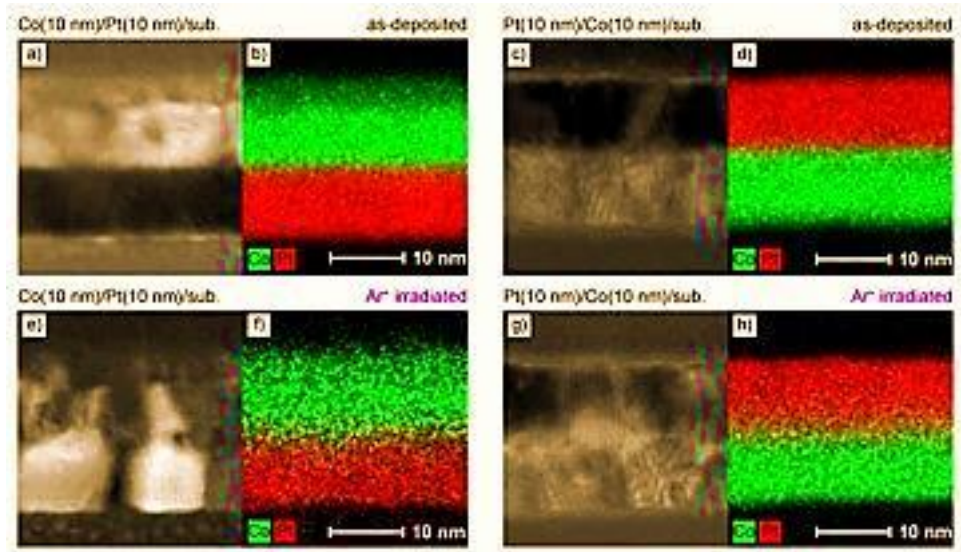
I. Vladymyrskyi et al. *J. Appl. Phys* **114**: 164314 (2013)

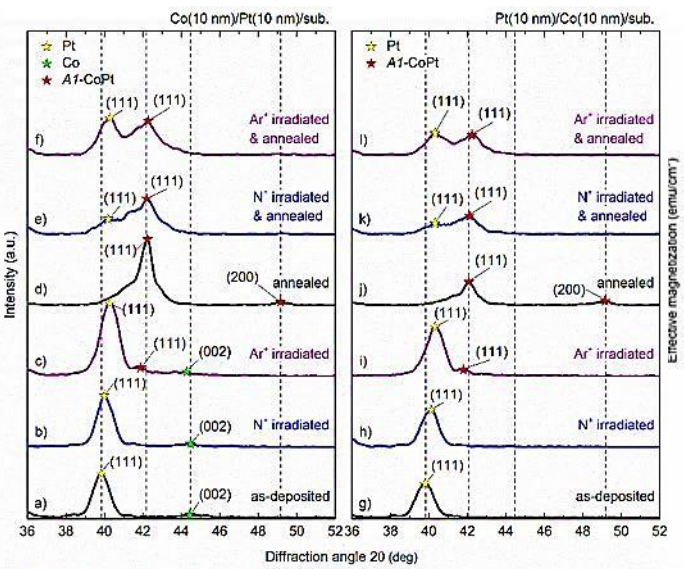
I. Vladymyrskyi et al. *J. Appl. Phys* **116**: 044310 (2014)

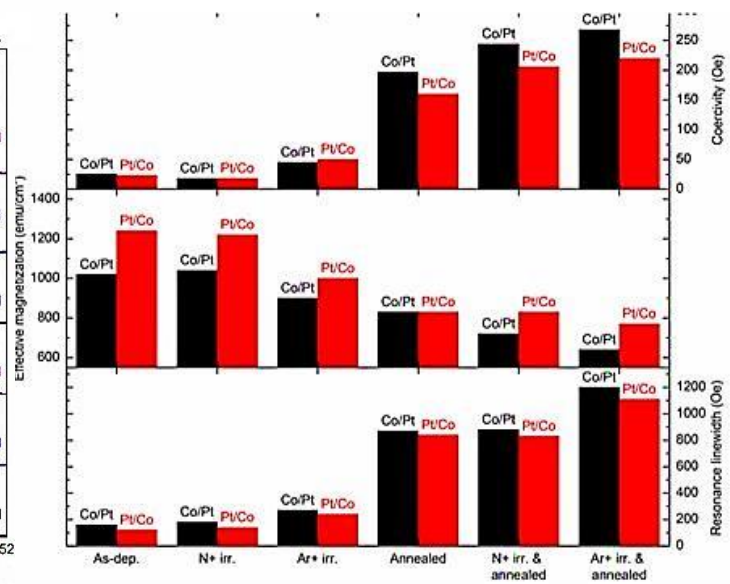
Низькотемпературне впорядкування та формування вираженої текстури [001] нанорозмірного феромагнетного матеріалу, осадженого на підкладинки Al_2O_3(0001)

Комплексне попереднє йонне та наступне термічне оброблення нанорозмірних плівкових композицій Co/Pt









Можливість здійснювати ефективний вплив на магнетні властивості плівкового стопу CoPt

R. Pedan, V. Golub, I. Vladymyrskyi et al. *Materials Chemistry and Physics* **327**: 129862 (2024)

Магнетні багатошарові наноструктури на основі антиферомагнетиків для елементів терагерцової спінтроніки

Вперше розроблено новий підхід до підвищення власних частот магнетного резонансу в багатошарових наноструктурах з обмінно-зв'язаними феромагнетними (F) і антиферомагнетними (AF) шарами (рис. 1). Ідея роботи полягає у використанні ефекту підмагнетування на інтерфейсі між сильним феромагнетиком і антиферомагнетиком із відносно низькою температурою Неєля (T_N≈300 K) для істотного модифікування магнетної динаміки в F/AF системі. Водночас резонансні частоти F/*AF*-структур підвищуються до суб-ТГц (рис. 2), і з'являється можливість заповнення частотної щілини між ГГц (характерним для F) і ТГц (характерним для AF) діяпазонами.

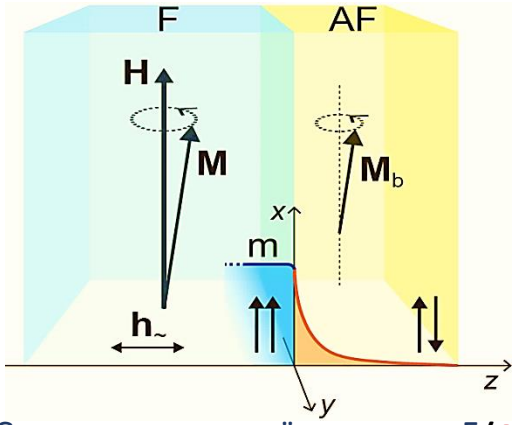


Рис. 1. Схема двошарової структури F/***AF*** з обмінним зв'язком під час збудження феромагнетного резонансу. Поблизу T_N в ***AF*** індукується магнетний момент $\mathbf{M}_b$, обмінно-зв'язаний з магнетним моментом **M** феромагнетика, що приводить до динамічної взаємодії двох магнетних моментів.

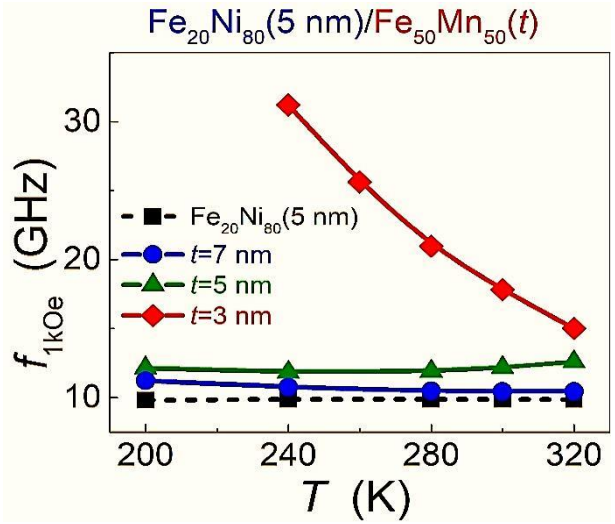
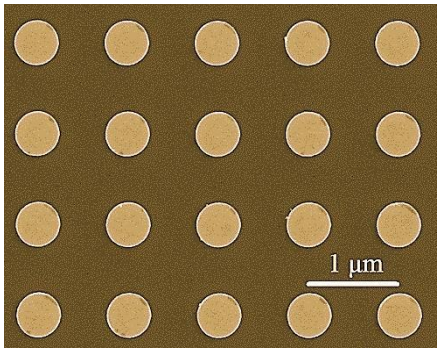


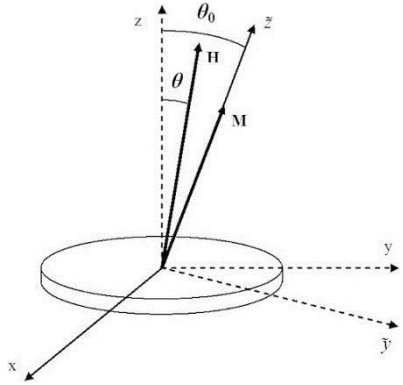
Рис. 2. Температурні залежності резонансних частот $Fe_{20}Ni_{80}$(5 нм)/$Fe_{50}Mn_{50}$(*t*)-наноструктур і чистої $Fe_{20}Ni_{80}$(5 нм)-плівки в полі 1 кЕ.

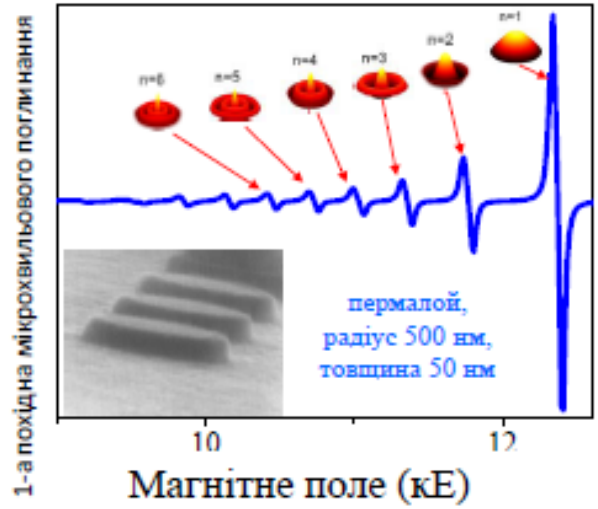
Запропоновані наноструктури є перспективними для високошвидкісних спінтронних застосувань.

D. M. Polishchuk, A. I. Tovstolytkin et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 54: 305003 (2021)

Феромагнетні нанодиски у насиченому стані



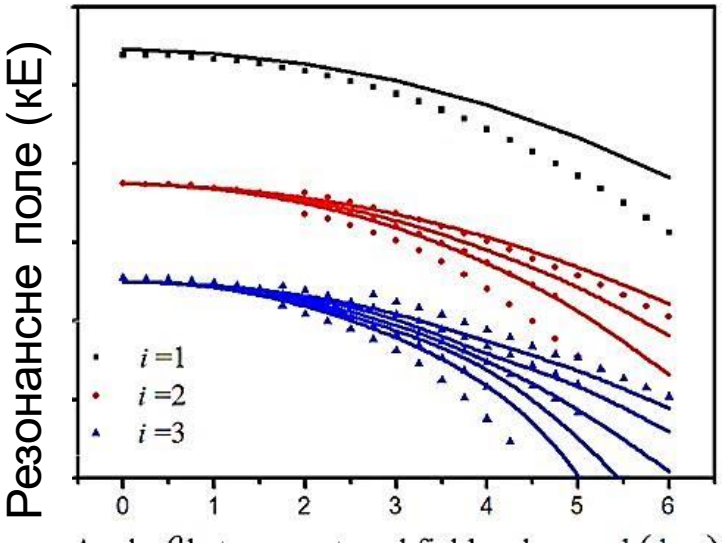




Методом феромагнетного резонансу досліджували ґратниці циліндричних мікродисків. Коли магнетне поле прикладалося в напрямку вздовж нормалі до площини зразка (θ = 0°), численні гострі резонансні піки (до 8 піків у разі пермалойових мікродисків) спостерігалися в області полів, нижчих за основний пік феромагнетного резонансу. Той факт, що такі періодичні спектри ніколи не спостерігалися в еталонних суцільних плівках, свідчить про те, що появу додаткових мод із дискретною частотою зумовлено скінченними розмірами дисків у площині плівки, і це має магнетостатичну природу.

Невелике відхилення зовнішнього магнетного поля від нормалі до площини структури (до 5°) приводить до розщеплення спін-хвильових мод і до залежности кількости розщеплених спектральних ліній від номера вихідної моди: найнижча мода не розщеплюється, перша мода розщеплюється на три, а п'ята — на п'ять рівнів.

Розвинута феноменологічна теорія збурень пояснює таку поведінку та дає просте правило, що пов'язує номер моди і з кількістю розщеплених рівнів як 2i − 1. Профіль кожної з мод є комбінацією Бесселевих функцій парних порядків.



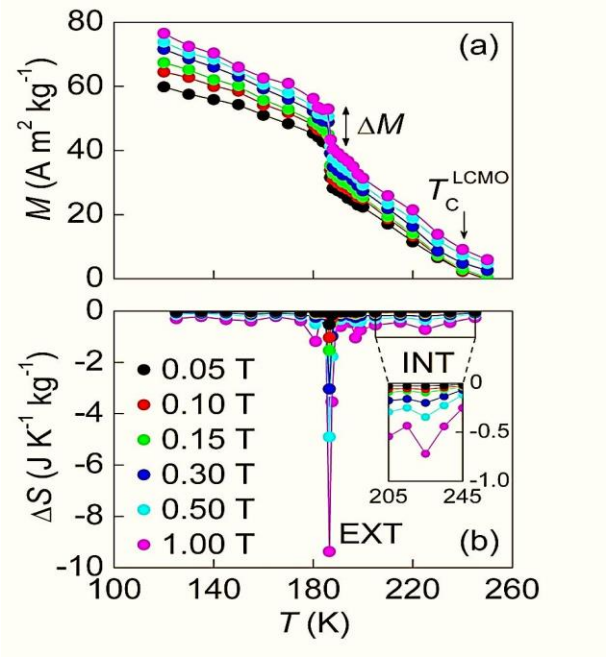
Кут θ між зовнішним полем і нормаллю

G.N. Kakazei, P.E. Wigen, K.Yu. Guslienko, V. Novosad, A.N. Slavin, V.O. Golub, N.A. Lesnik, Y. Otani, Appl. Phys. Letters, 85: 443–445 (2004)
G.N. Kakazei, Yu.G. Pogorelov, M.D. Costa, P.E. Wigen, P.C. Hammel, V.O. Golub, T. Okuno, V. Novosad, Phys. Rev. B, 74: 060406 (2006)
S.A. Bunyaev, V.O. Golub, O.Yu. Salyuk, E.V. Tartakovskaya, N.M. Santos, A.A. Timopheev, N.A. Sobolev, A.A. Serga, A.V. Chumak, B. Hillebrands, G.N. Kakazei, Scientific Reports, 5: 18480 (2015)

Деформаційно опосередковані магнетоіндуковані ефекти в гетероструктурах $(La,Ca,Sr)MnO_3/(Ba,Y)TiO_3$

Вперше експериментально зафіксовано, що перовськітні гетероструктури феромагнетик–сеґнетоелектрик можуть виявляти стимульований гігантський магнетокалоричний ефект, який є результатом взаємодії деформаційних полів в області міжфазного інтерфейсу. Для конкретної комбінації перовськітних оксидів (манґаніт лантану-кальцію/титанат барію) одержано, що величина ізотермічної зміни ентропії, нормованої на одиницю магнетної індукції, є порівнянною з рекордними величинами магнетокалоричного ефекту, досягнутими дотепер.

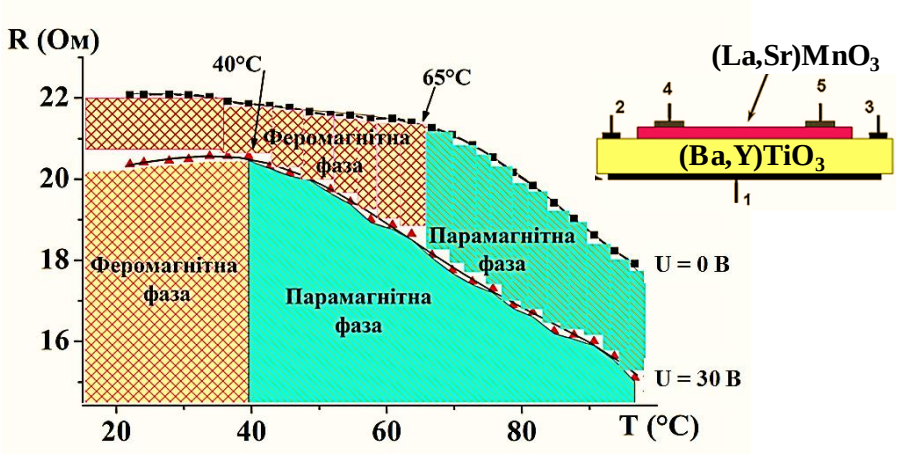
X. Moya, L. E. Hueso, F. Maccherozzi, A. I. Tovstolytkin, et al. Nature Mater., 12: 52 (2013)



З'ясовано закономірності зміни магнетних, магнеторезистивних і резонансних параметрів композитних перовськітних гетероструктур «феромагнетик–сеґнетоелектрик» під дією зовнішніх магнетного та електричного полів

Розроблено методику електричного керування магнетними параметрами перовськітних гетероструктур «заміщений манґаніт/заміщений титанат»

Вказано шляхи оптимізації параметрів гетероструктур для підсилення магнетоелектричного ефекту

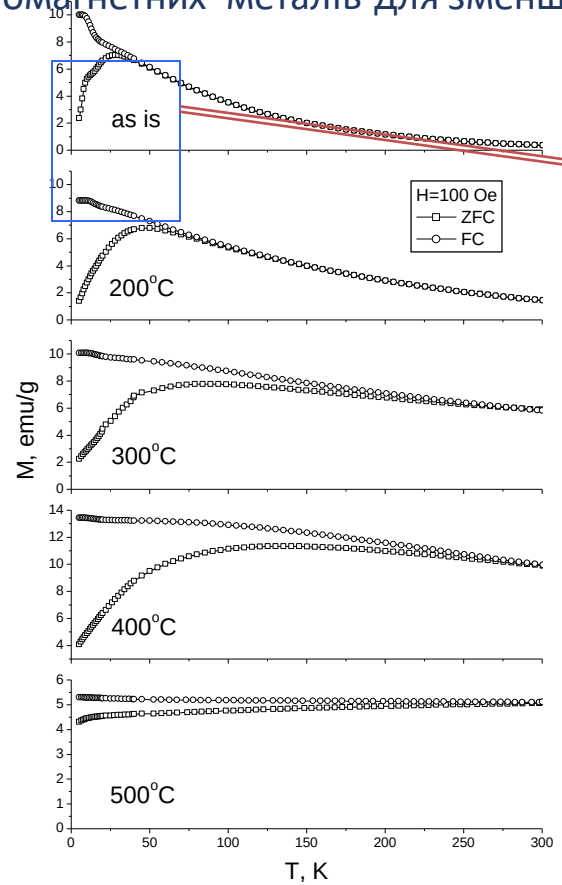


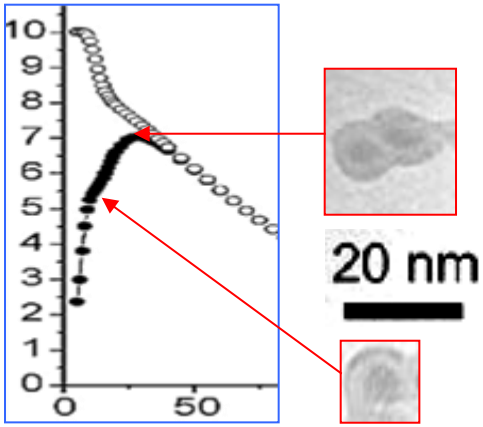
Експериментально продемонстровано, що за подачі електричної напруги на сеґнетоелектрик між електродами 1 і 2 відбувається зсув температури магнетного фазового переходу в плівці $(La,Sr)MnO_3$, а також пониження її електричного опору.

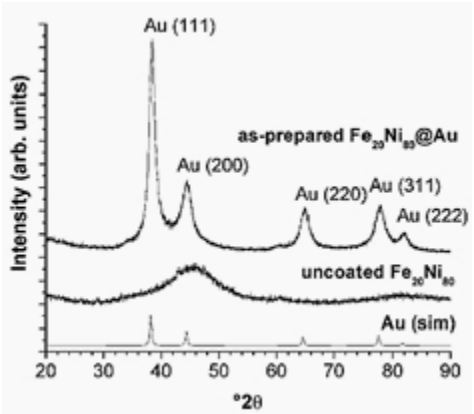
J. Europ. Ceram. Soc., 30: 259 (2010); Acta Phys. Pol. A, 133: 1006 (2018)

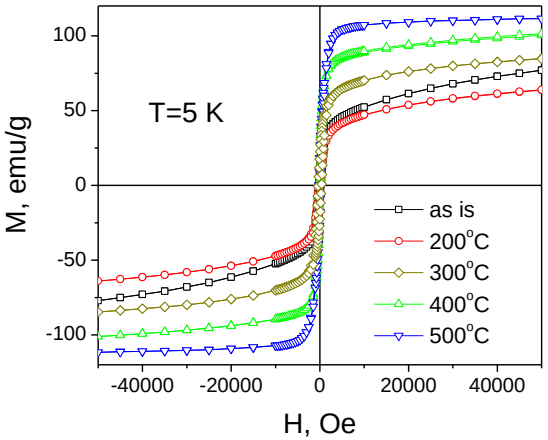
Використання магнетних методів для контролю розмірів і складу композитних наночастинок

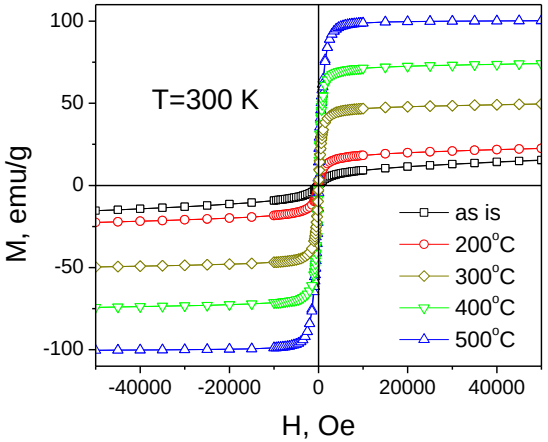
Розроблено магнетні методи, які уможливлюють визначати концентрації, об'єм і склад магнетних фаз у складних композитних нанооб'єктах, де результати стандартних методів є неоднозначними. Зокрема, продемонстровано можливість контролю ефективности захисного покриття наночастинок феромагнетних металів для зменшення впливу зовнішніх чинників, наприклад окиснення.









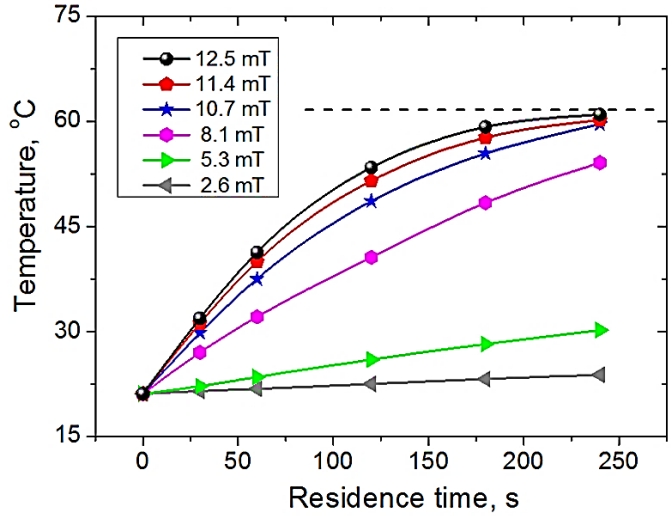


B.L. Cushing, V. Golub, C.J. O'Connor, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 65, No. 4: 825–829 (2004)
Z. Ban, Y.A. Barnakov, F. Li, V.O. Golub, C.J. O'Connor, Journal of Materials Chemistry, 15, No. 43: 4660–4662 (2005)

НАНОМАГНЕТИКИ ДЛЯ СМАРТ-СИСТЕМ САМОКОНТРОЛЬОВАНОГО НАГРІВУ

Запропоновано використання наномагнетиків у якості самореґульованих нагрівачів. Оскільки індукований змінним полем нагрів магнетних діелектриків є ефективним лише нижче температури магнетного впорядкування, необхідна температура підтримується автоматично. Розроблено шляхи оптимізації параметрів наномагнетиків для різних застосувань.

Вперше експериментально продемонстровано можливість цілеспрямованого керування магнетними параметрами та температурою нагріву наночастинок заміщених манґанітів і магнетних рідин, які є перспективними індукторами гіпертермії для лікування онкологічних пухлин.



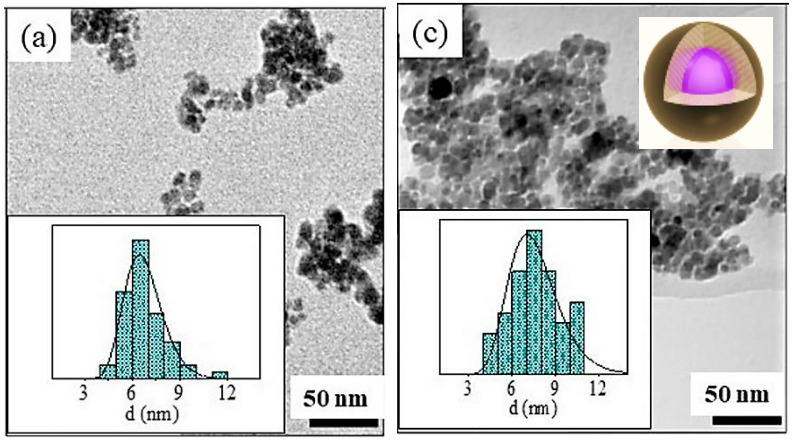
Температура магнетної рідини прямує до температури магнетного впорядкування T_C

Залежність температури магнетної рідини на основі наночастинок $(La,Sr)MnO_3$ від часу витримки у змінному магнетному полі

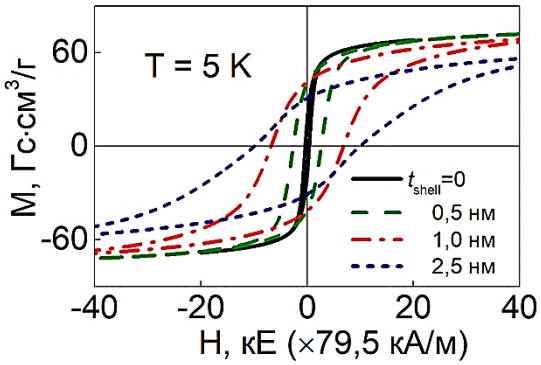
(f = 300 kHz, $\mu_0 H_{max}$ = 2–12,5 мТ)

V.M. Kalita, A.I. Tovstolytkin et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 17: 18087 (2015).
D.M. Polishchuk , A.I. Tovstolytkin et al., Low Temp. Phys., 43: 570 (2017).
A.I. Tovstolytkin et al., J. Magn. Magn. Mater., 498: 166088 (2020).
O.I. Nakonechna , A.I. Tovstolytkin et al., Part. & Part. Sys. Charact., 39: 2200095 (2022).

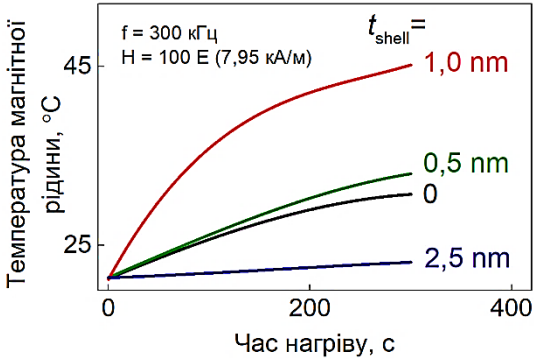
Розроблено метод керування параметрами магнетних наночастинок шляхом використання **архітектури «ядро/оболонка»** (ядро наночастинки — одного хемічного складу, оболонка — іншого). Досліджено магнетні та калориметричні властивості **наночастинок $Fe_3O_4/CoFe_2O_4$** з фіксованим діяметром ядра ≅ 6,3 нм і товщиною оболонки $CoFe_2O_4$ до 2,5 нм.
Проведено оптимізацію параметрів для використання таких наночастинок у магнетній гіпертермії — перспективному терапевтичному методі лікування онкологічних захворювань.



ПЕМ-зображення ансамблів наночастинок з t_{shell} = 0 (ліворуч) і t_{shell} = 1 нм (праворуч)



Залежність намагнетованости від напруженості магнетного поля для **наночастинок $Fe_3O_4/CoFe_2O_4$** з різною товщиною оболонки $CoFe_2O_4$ (t_{shell})



Залежність температури нагрівання від часу для магнетних рідин на основі **наночастинок $Fe_3O_4/CoFe_2O_4$** з різною товщиною оболонки $CoFe_2O_4$ (t_{shell})

Показано перспективність застосування **архітектури «ядро/оболонка»** для оптимізації магнетних параметрів наночастинок (вислідної намагнетованости, ефективної константи анізотропії), зокрема для досягнення параметрів, необхідних для використання наночастинок в якості індукторів магнетної гіпертермії.

S.O. Solopan, A.I. Tovstolytkin et al., J. Alloys and Comp., 788: 1203 (2019)
A.I. Tovstolytkin et al., J. Magn. Magn. Mater., 498: 166068 (2020)