Фізико-технічні засади створення керованих нано- і мікроструктур на поверхні твердих тіл

Наукова робота на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2021 року

висунута Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

Підсумок багаторічної праці виконавців у царині динамічних трансформацій морфології нано- та мікрооб'єктів внаслідок фізичних явищ на їх поверхні, фізики плазми, конденсованих середовищ і взаємодії між іонними потоками надвисокої густини, породженими плазмовими середовищами, та металічними, напівпровідниковими й діелектричним мішенями. В процесі роботи було досліджено як елементарні електронні та атомно-молекулярні процеси, так і колективні явища притаманні системам із багатьох складових. Створені й вивчені ієрархічні структури на поверхні твердих тіл, а відтак застосовані для посилення адгезії покриттів.

Автори

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

Горшков В’ячеслав Миколайович, *докт. фіз.-мат. наук*
Кузьмичєв Анатолій Іванович, *докт. техн. наук*

Інститут фізики НАН України

Войтенко Олександр Іванович, *докт. фіз.-мат. наук*
Габович Олександр Маркович, *докт. фіз.-мат. наук*

Інститут металофізики НАН України

Короташ Ігор Васильович, *канд. фіз.-мат. наук*
Руденко Едуард Михайлович, *докт. фіз.-мат. наук*

Товариство «ГРЕСЕМ ІНОВЕЙШН»

Семенюк Валерій Федорович, *канд. фіз.-мат. наук, директор*
Семенюк Надія Іванівна, *провідний науковий співробітник*

Загальна проблематика роботи *– встановлення фізичних механізмів формування структур різного походження на поверхні твердих тіл і факторів керування їх самоузгодженим впливом на динаміку морфології поверхонь для досягнення високого рівня впорядкованості в згенерованих нано/мікрозбуреннях*

- *Розроблені оригінальні теоретичні концепції щодо процесів, які протікають як на поверхні утворюваних структур, так і в їх об'ємі з безпрецедентною якісною і кількісною деталізацією взаємовпливу фізичних явищ.*
- *Розвинено методи керування нестійкими кінетичними процесами, які забезпечують самовпорядкування в системах нано/мікро кластерів з формуванням необхідних фізичних параметрів.*
- *З'ясовані особливості кулонівської взаємодії в двох- і тришарових структурах у застосуванні до електричних зарядів і диполів.*
- *Створена нова теорія тунельних струмів між електродами, які є надпровідниками з хвилями зарядової густини, з урахуванням неоднорідності об'єктів.*
- *Відкрито ефект гігантського блокування спін-поляризованого тунельного струму - основу створеної низки базових елементів надпровідникової спінтроніки.*

- *Встановлені механізми ефективного поглинання зовнішніх ВЧ полів у геліконній плазмі та методи керування іонно-плазмовими потоками надвисокої густини.*
- *Розроблено низку унікальних іонно-плазмових установок для керованої модифікації поверхонь твердих тіл і керованого синтезу багатошарових наноструктур із бажаними властивостями.*
- *Вперше в світі згенеровані низькоенергетичні іонно-плазмові потоки з надкритичною густиною струму та відкрито унікальний ефект інтенсивного розпилення матеріалу мішеней із значним супутнім структуруванням їх поверхні, названий «батутним ефектом».*
- *Виявлено явище ефективного блокування ІЧ (теплового) випромінювання наноструктурованими іонно-плазмовими конденсатами і створені високоефективні маскувальні знаряддя – ІЧ (теплові) «невидимки» (IR - STEALTH).*

Практична користь

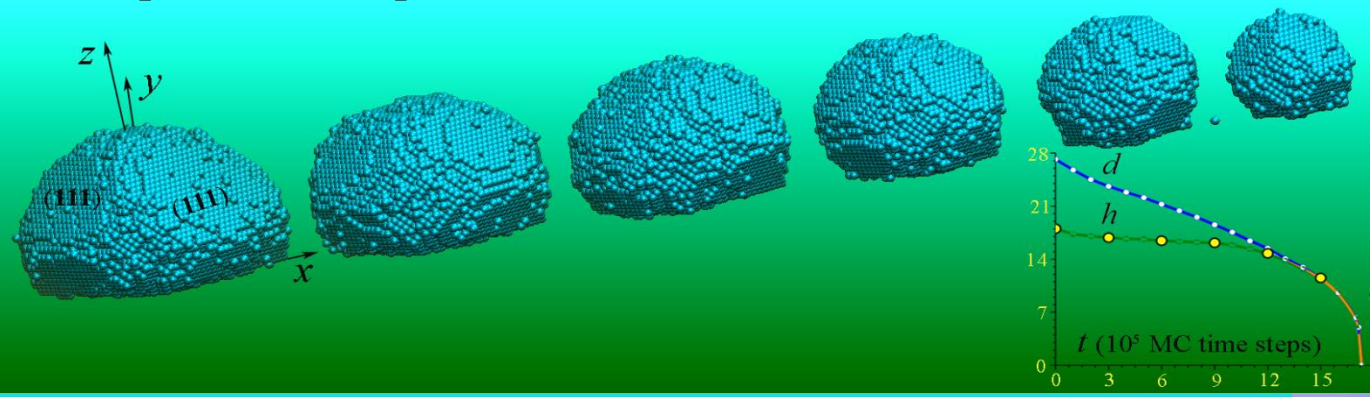
Розвинуті методи контролю динаміки нанооб'єктів були реалізовані в різних технологічних процесах: у виготовленні (a) міжелементних контакторів у інтегральних схемах, (b) високоефективних платинових каталізаторів, (c) наночастинок різноманітних правильних форм, нанокластерів типу ядро-оболонка і періодично модульованих за площею перерізу металевих та напівпровідникових квазі-одновимірних структур для їх застосування в оптоелектроніці, сенсорній техніці і медицині, (d) оптичних метаматеріалів та фотонних бар'єрів на основі діелектричних багатошарових і наноградієнтних структур з перспективою застосування в СТЕЛС-технології, (e) магнітних однодоменних наноструктур із суперпарамагнітним станом при кімнатних температурах. Вперше створені інтегральні схеми ефективних мікрохвильових фільтрів на базі плівок високотемпературних надпровідників.

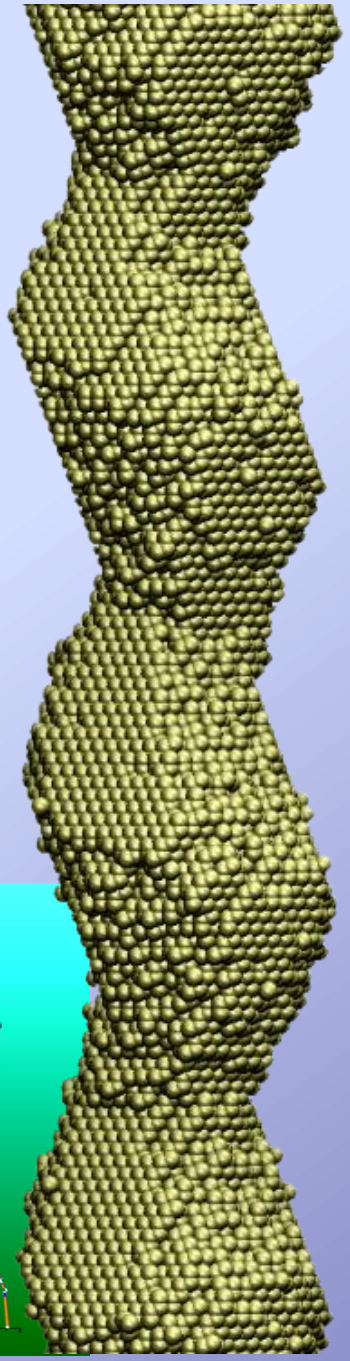
Структура роботи

1. Фізичні засади створення керованих нано- і мікроструктур
2. Створення унікального іонно-плазмового обладнання для синтезу керованих нано- і мікроструктур
3. Синтез керованих нано- і мікроструктур
4. Нові принципи надпровідної електроніки та спінтроніки й створення пристроїв на цій основі

1. Фізичні засади створення керованих нано- і мікроструктур

Теоретичні дослідження факторів контролю динамікою багато-атомних систем, виконані на базі розвинутої оригінальної Монте-Карло моделі (с кількістю до 3×10^6 атомів) і опробовані на структурах нанорозмірного масштабу з успішним вирішенням низки прикладних проблем

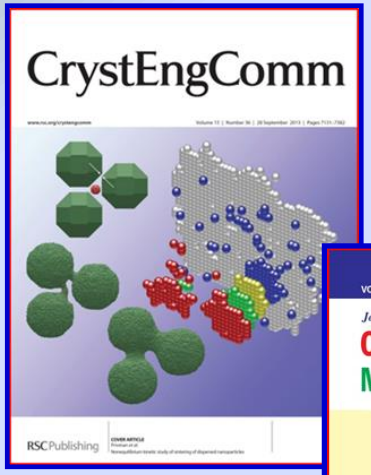


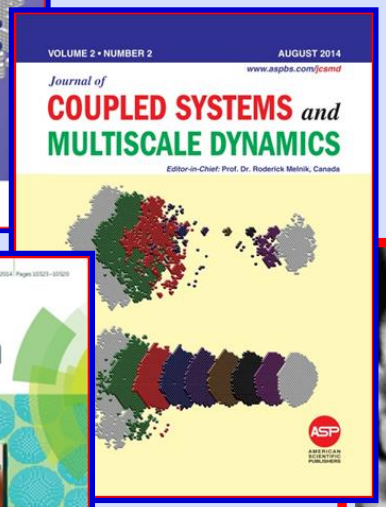


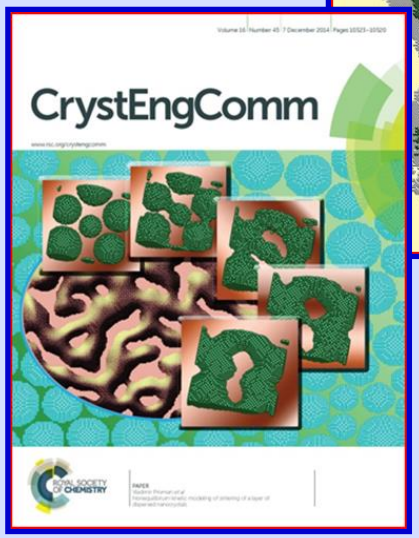
Керування морфологією шарів Au/Ag - наночастинок при їх спіканні

Розташовані на полімерній основі ізольовані наночастинки* (НЧ) *при спіканні утворюють провідну доріжку. ***Застосування*: RFID *(radio frequency identification),***
OPV *(organic photovoltaic)*, OFET *(organic field-effect transistor)*

1. ***Оптимізовані часові проміжки нагрівання та охолодження системи***
2. ***Визначені найбільш сприятливі максимальні температури прогріву***
3. ***Знайдено оптимальний розподіл НЧ за розміром для забезпечення механічної стійкості та високої провідності доріжок***

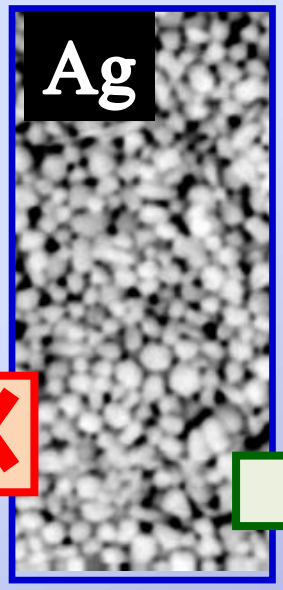


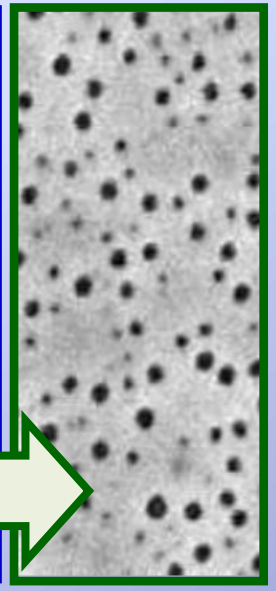




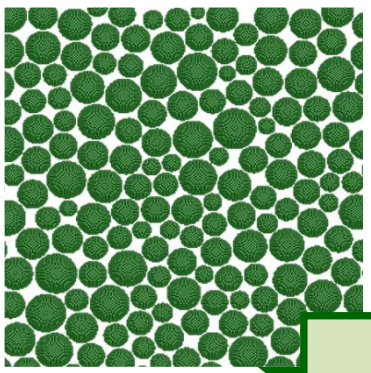
Публікації, графічний матеріал котрих винесено на обкладинки журналів

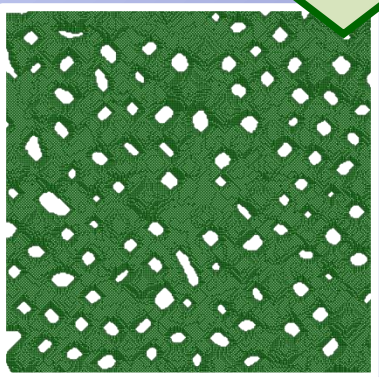
Експеримент





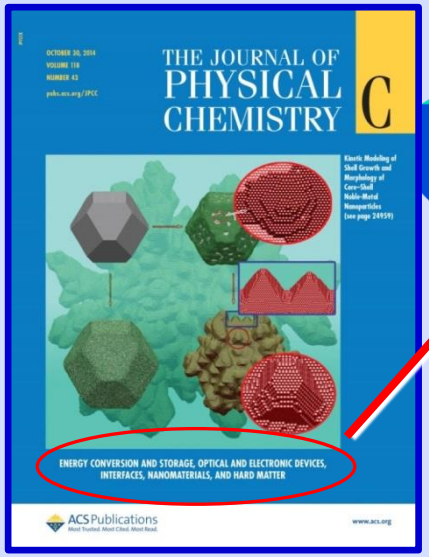
Неоптимізований режим





Оптимальний режим (теорія)

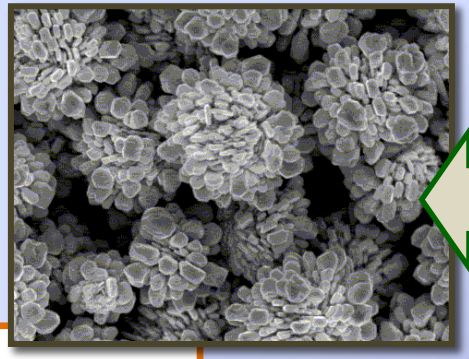
Керований синтез висококаталітичних поверхонь та наночастинок типу ядро-оболонка благородних металів з розвиненою морфологією



Графіка опублікованих результатів на обкладинках наукових журналів

Застосування

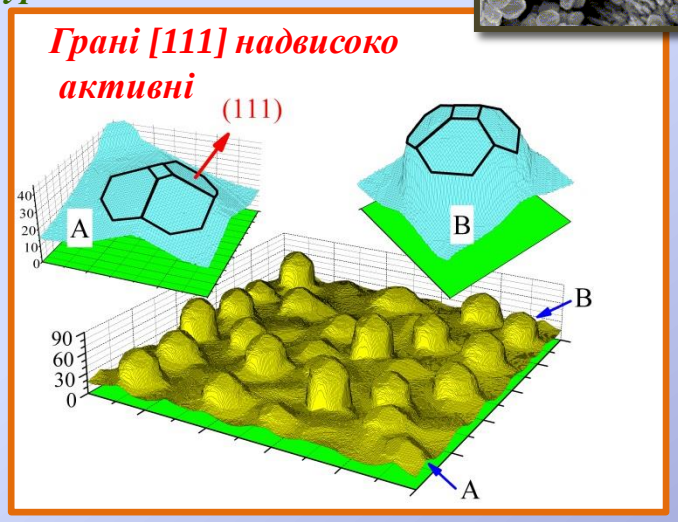
ENERGY CONVERSION AND STORAGE, OPTICAL AND ELECTRONIC DEVICES, INTERFACES, NANOMATERIALS, AND HARD MATTER

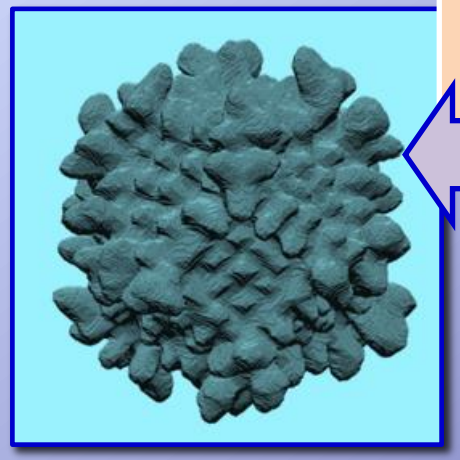


Експеримент **(CAMP, *Clarkson university, USA*)**

Платина,* Pt, *осаджується на золоту підкладку. Стимульована нестійкість синтезу покриття приводить до значного збільшення відношення <u>площа поверхні/маса</u>

Грані [111] надвисоко активні



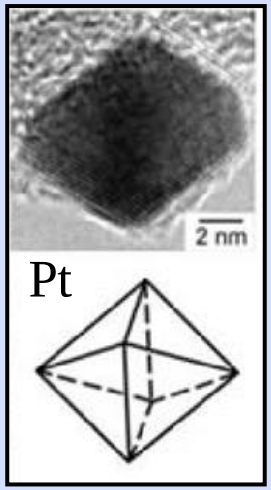


Синтез в теоретично визначеному режимі

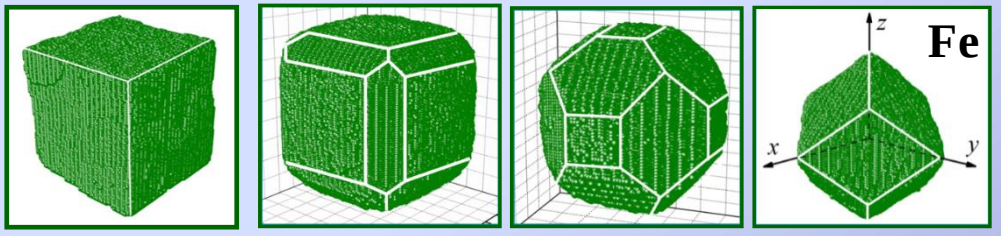
Керований синтез наночастинок в дифузійному режимі

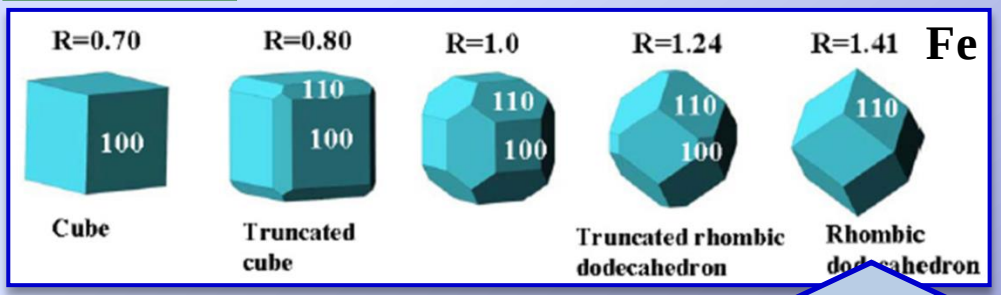
Базова ідея – *приборкати взаємний вплив форм наночастинок на розподіли просторових і поверхневих дифузійних потоків та, балансуючи на межі збудження хаотичного режиму росту, виходити на різні «траєкторії» в динаміці морфології частинок.*

Результат – *режими синтезу з того самого металу наночастинок різної форми й різними електрооптичними властивостями з широким спектром застосувань.*

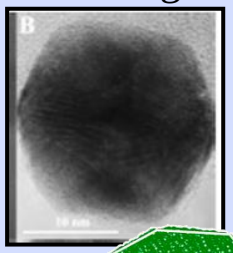


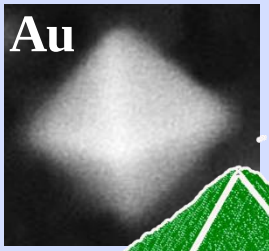
Синтез НЧ у різних режимах
(Монте-Карло модель)

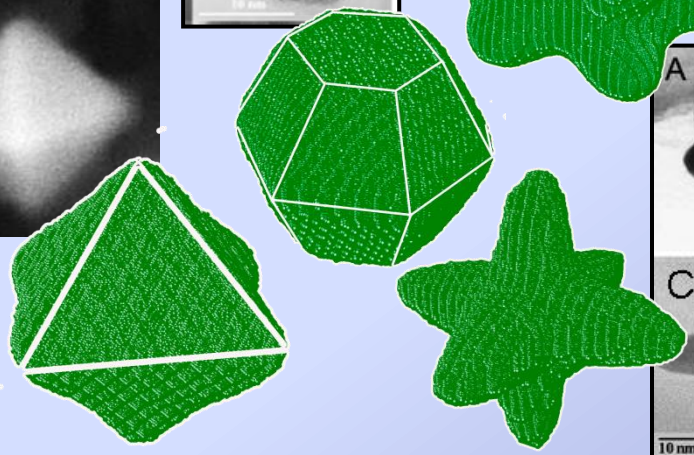


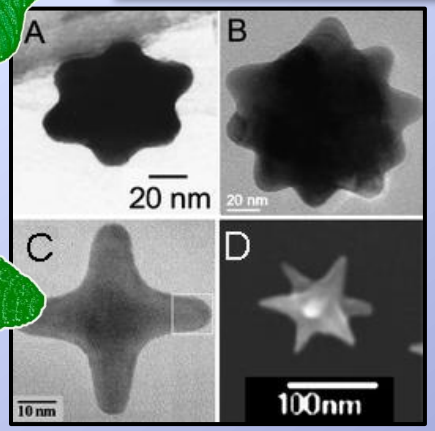


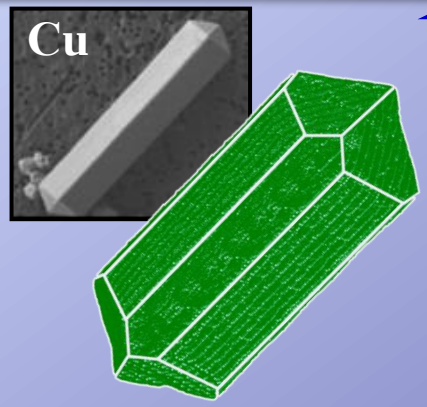
Au-hexagon











Експ. рез.
North-West Pacific Nat. Lab.

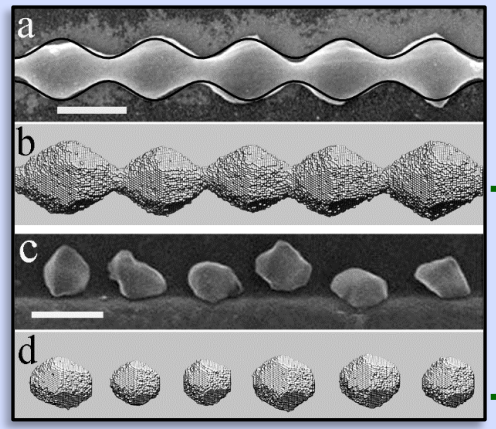
Нові концепції в механізмах термічної трансформації морфології поверхонь кристалічних нанодротів

Мотивація досліджень *– проблеми термічної стійкості елементів мікросхем; задачі створення резонаторів і хвильоводів необхідної конфігурації та з бажаними параметрами*

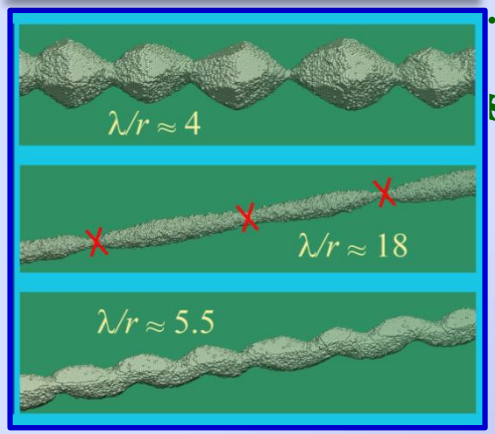
Результат *– Збудження модуляцій поверхні дроту з довжинами хвиль λ є керованим. Значні відхилення від класичного значення $\lambda \approx 9r_0$ (r_0 -початковий радіус) досягаються зміною орієнтації осі нанодроту відносно внутрішньої кристалічної структури (зміні анізотропного розподілу густини поверхневої енергії) і швидкості поверхневої дифузії атомів зовнішнім опроміненням. Можливе навіть формування застиглих у часі короткохвильових структур.*

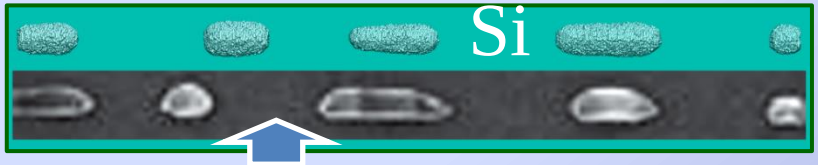
Анізотропія динаміки морфології Si - нанодроту

Експеримент



Теорія

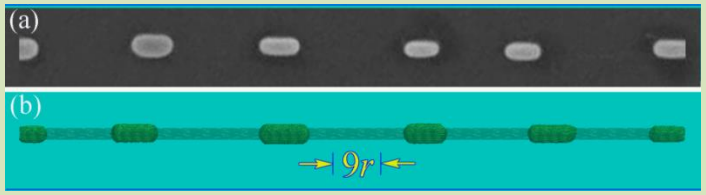




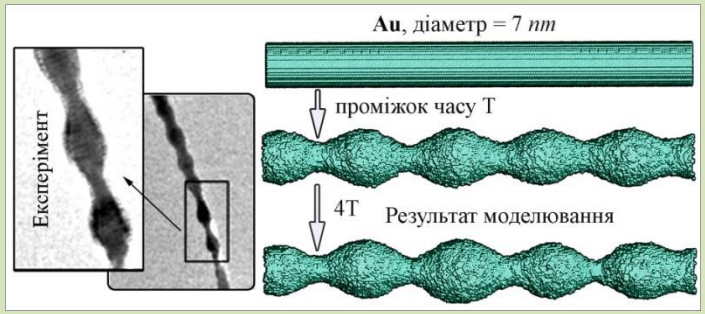
Результат моделювання $\lambda/r_0 \approx 16$

Експеримент (Charles Lieber group, *Harvard*

Au - нанодріт, [110]-орієнтація



Розпад при $\lambda/r_0 \approx 25$ теорія та експеримент

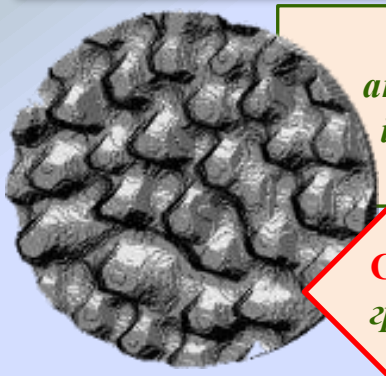


«Заморожені» у часі модуляції такого ж дроту при опроміненні електронами

$\lambda/r_0 \approx 5.6$

Стимульований фазовий перехід в морфології поверхні, «roughening transition» (RT), як фактор керування періодом самовпорядкування

При температурах вище критичної гладка поверхня не відповідає мінімуму її вільної енергії і становиться періодично поко-робленою зі зменшенням кількості міжатомних зв'язків, $\Delta U > 0$. *Така трансформація відбувається завдяки зменшенню вільної енергії системи:* $\Delta F = \Delta U - T\Delta S < 0$ *при* $T = const$ *внаслідок теплообміну з середовищем (зміна ентропії* $\Delta S > 0$). *Спонтанно ефект RT виникає тільки на вибраних гранях кристалу з заданою граткою.*

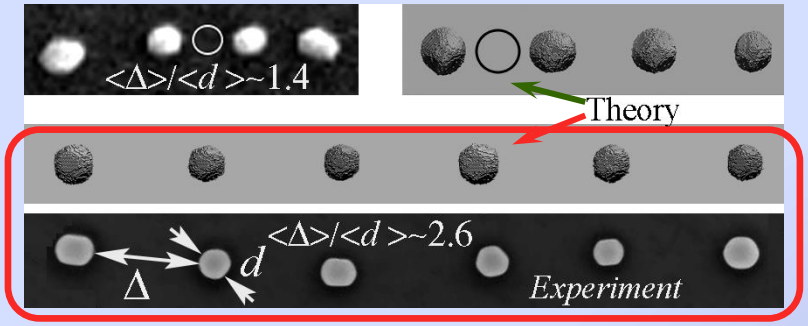


Парадокс! *Інтенсифікація поверхневої дифузії атомів зовнішнім опроміненням (електронами, іонами, але без помітного нагріву) викликає RT на гранях, де цей ефект спонтанно не виникає*

Стимульована *модифікація [111]-грані FCC гратки-результат; Монте-Карло моделювання*

Наслідки інтенсифікації поверхневої дифузії **неоднозначні!**

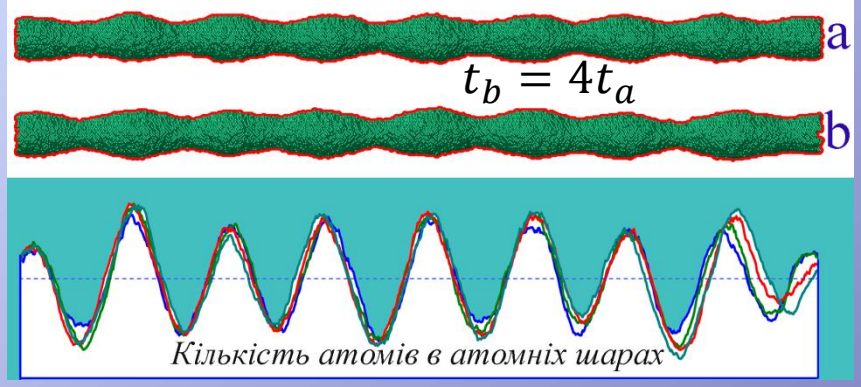
Природний розпад [111]-Ag-нанодроту



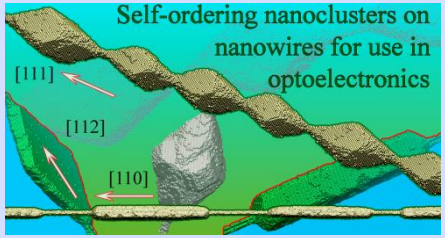
Розпад Ag-нанодроту при стимуляції поверхневої дифузії «холодними» іонами Ar^+ *(ефект подовження збурень поверхні*

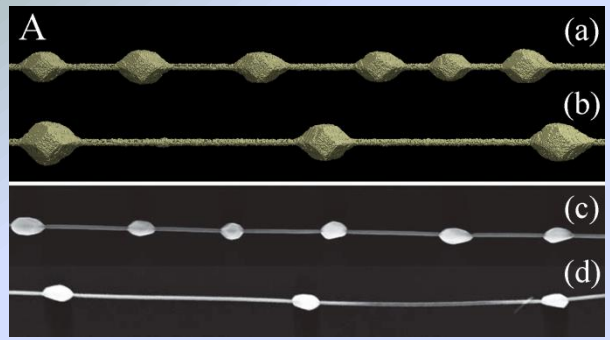
Монте-Карло моделювання

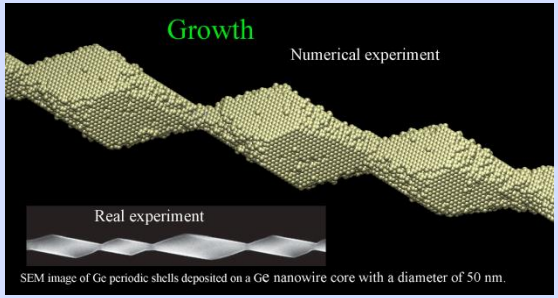
Збудження стабільних короткохвильових модуляцій при [100]-орієнтації нанодроту



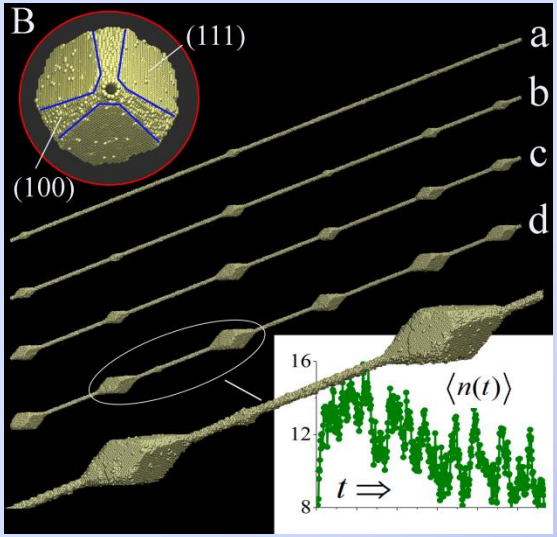
Керування процесами нуклеації при синтезі ланцюжків нанокластерів на Ge-Si-нанодротах

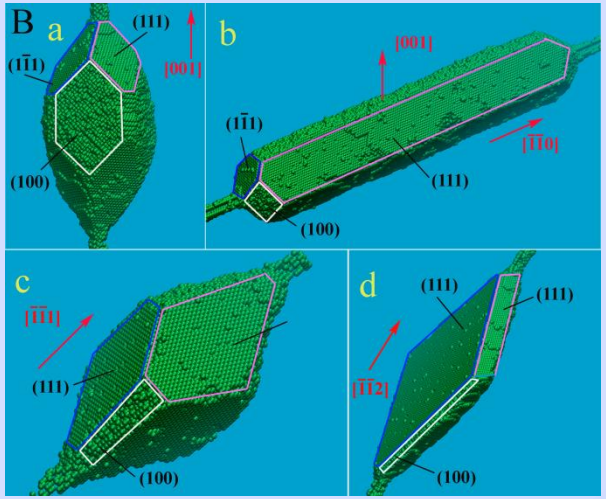




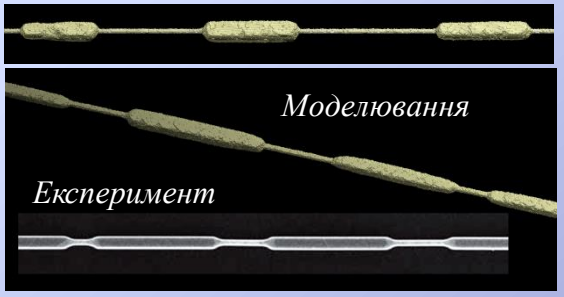


Варіація періоду нуклеації (теорія і експеримент) …

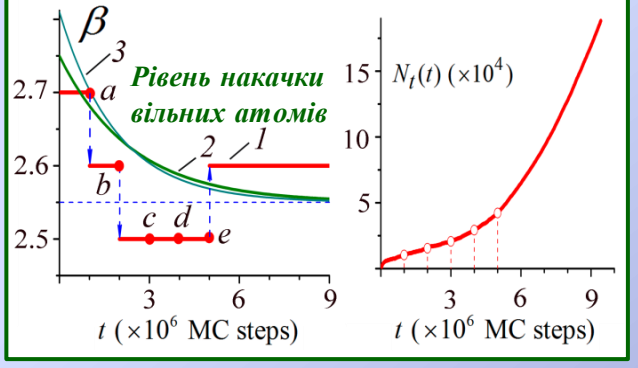


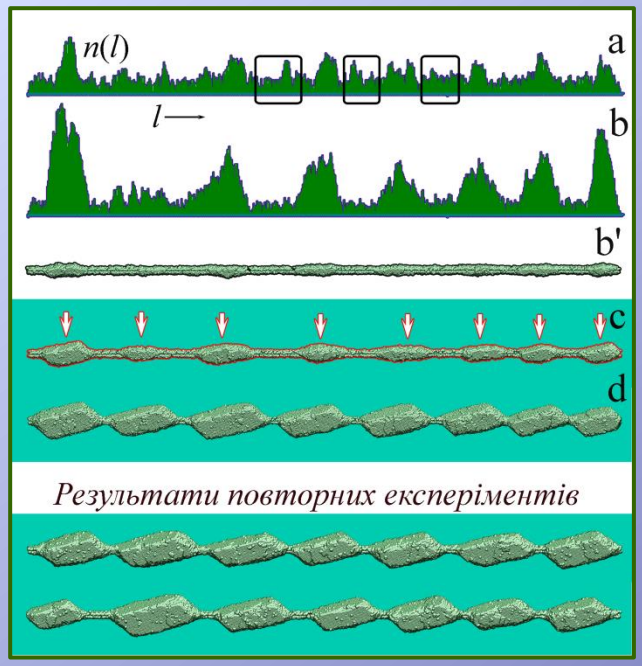


… та форми нанокластерів при зміні орієнтації базового нанодроту



Досягнення гарантовано високого рівня самовпорядкованості в оптимізованому режимі синтезу

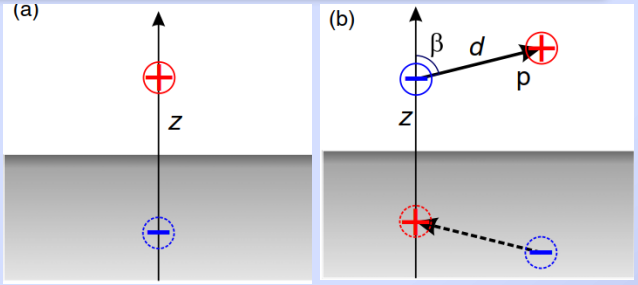




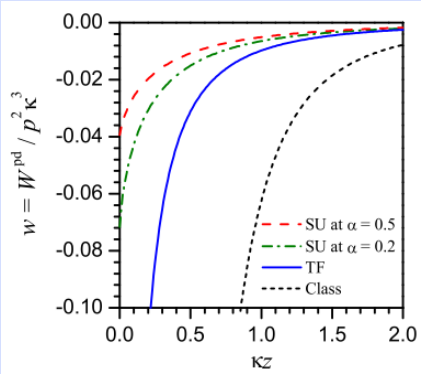
Експерименти виконано в Harvard university

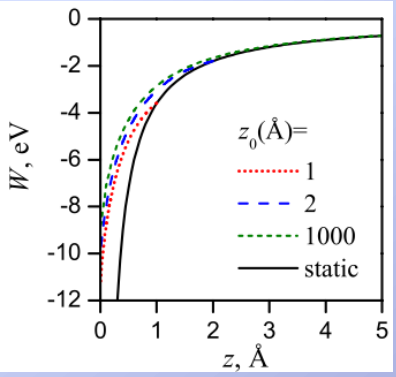
Дзеркальні сили в шаруватих системах

Вивчення процесів, що відбуваються при взаємодії заряджених частинок та полярних молекул (диполів) класичної або квантової плазми з поверхнею мішені. Основну роль відіграють дзеркальні (поляризаційні) сили.



1. ***Скінченність радіусу екранування електростатичного поля в середовищах (просторова дисперсія діелектричної проникності)***
2. ***Інерційність динамічного відгуку середовищ на заряд (диполь), який рухається (часова дисперсія діелектричної проникності)***

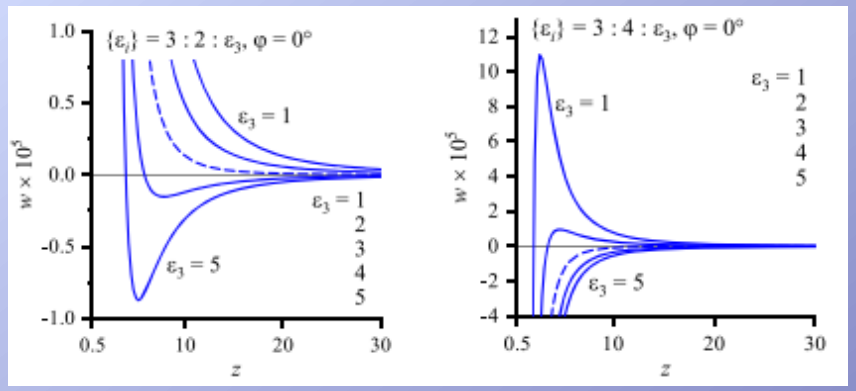




Як результат, в обох випадках дзеркальні сили виходять на насичення, тобто якісно докорінно відрізняються від класичної моделі.

3. Керування орієнтації електричним полем адсорбованої дзеркальними силами полярної молекули

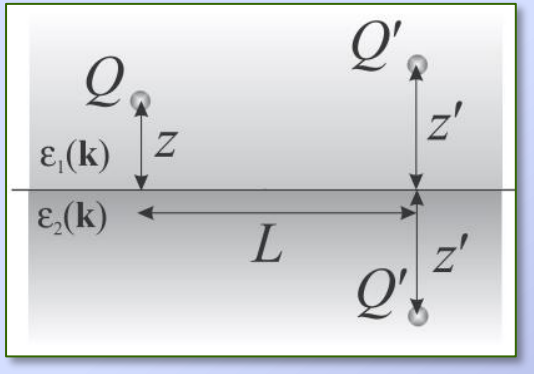
4. Для тришарових систем: Виникнення електростатичних потенціальних бар'єрів або ям в залежності від співвідношень між екрануючими властивостями середовищ



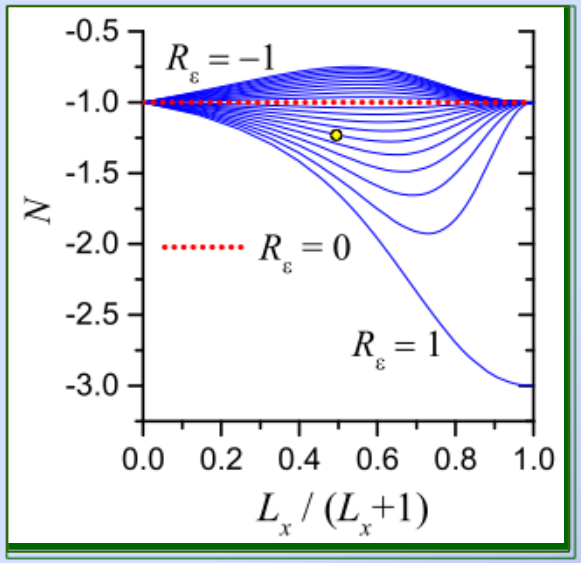
Кулонівська взаємодія в шаруватих системах

Вивчення процесів взаємодії осаджених частинок (зарядів та диполів) на поверхні (поверхнях) розділу, що може приводити до виникнення неоднорідностей різного масштабу

Складнощі виникають через те, що потрібно враховувати не тільки пряму взаємодію зарядів чи диполів, але й їх взаємодію з наведеними зарядами, тобто маємо справу з системою багатьох частинок.

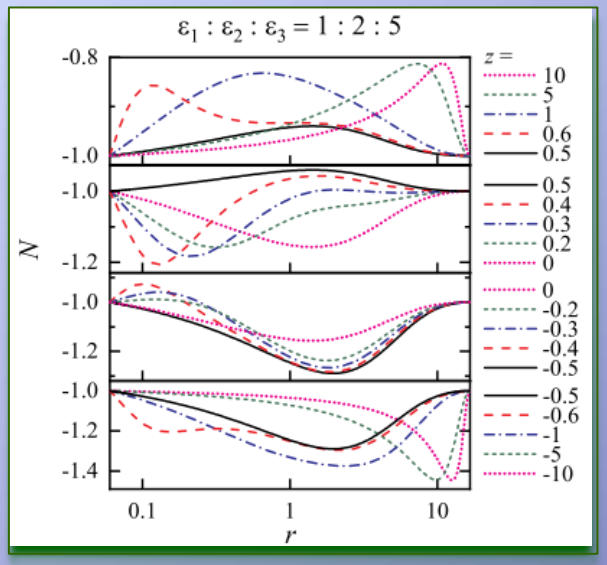


Показано, що просторова залежність енергії взаємодії починає відрізнятися від класичної кулонівської $W \sim L^{-N}$, що радикально впливає на масштаб виникаючих неоднорідностей при кластеризації груп зарядів чи диполів.



Двошарова система:

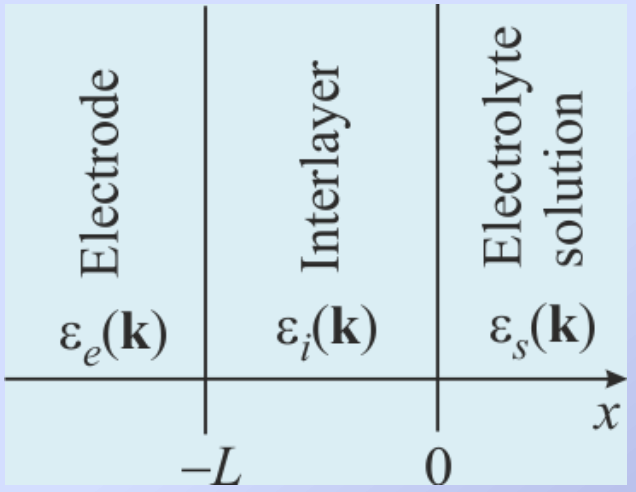
Тришарова система:

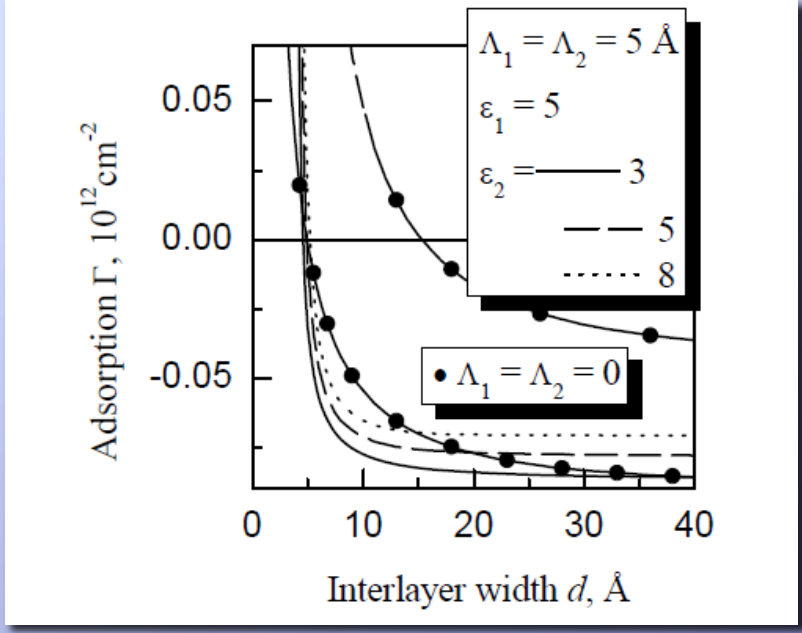


Електростатичне керування адсорбцією іонів у рідкокристалічних комірках

Часто на рідкокристалічному дисплеї зберігається залишкове зображення попереднього кадру – ефект прилипання. Цей ефект можуть викликати іони, що існують всередині і зовні. Їхня адсорбція призводить до утворення на поверхні зарядженого шару, що має наслідком часткову компенсацію прикладеного електричного поля. Аби цьому запобігти, було запропоновано наносити додатковий полімерний шар на металевий електрод (зазвичай, ITO).

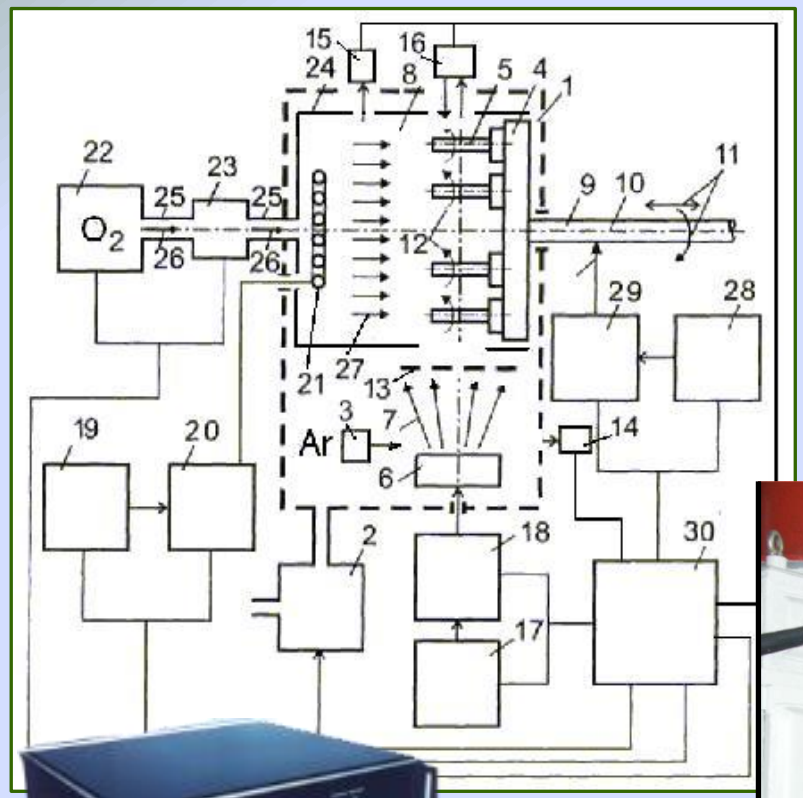
Згідно з нашою теорією, грою параметрів, зокрема, діелектричними властивостями шарів та товщиною полімерного шару, можна забезпечити негативну адсорбцію, тобто відштовхування іонів від межі розділу між додатковим шаром та рідкокристалічною товщею (розчином електроліту).





2. Створення унікального інноваційного іонно-плазмового вакуумно-технологічного обладнання для синтезу керованих нано- і мікроструктур

Центр іонно-плазмової обробки й осадження багатошарових і градієнтних наноструктур в імпульсному режимі

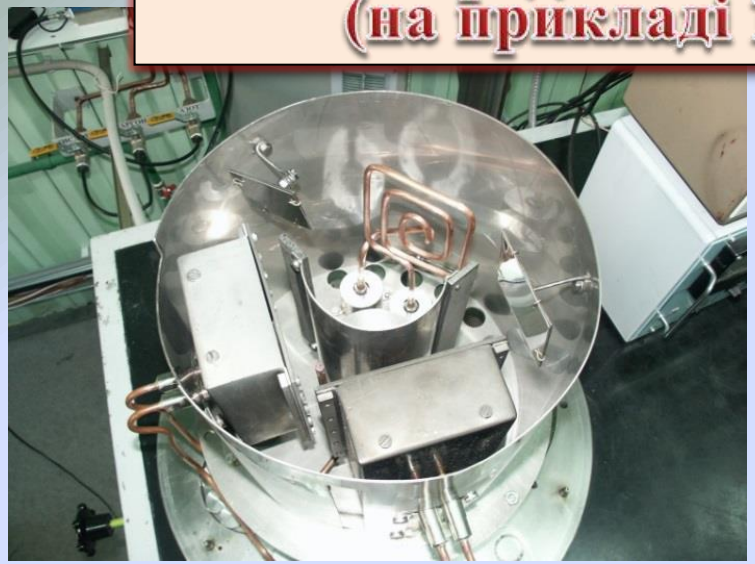


1 – *вакуум-простір*, 2 – *система для відкачування*,
3, 22 – *робочі гази (Ar, O_2 та ін.)*,
4, 9-12 – *тримач підкладок* 5 – *підкладки*,
6 – *імпульсні магнетронні розпилювачі МР*,
7 – *потік розпорошені речовини*,
8, 24 – *іонізатор -активатор робочого газу*,
13 – *заслінка*, *14 - 16 спектрофотометри*,
17, 19, 28 – *DC блоки живлення*,
18, 20, 29 - імпульсні модулятори,
21 – ВЧ індуктор, 25 – імпульсний клапан,
27 – потік активованого газу,
30 - керуючий процесор

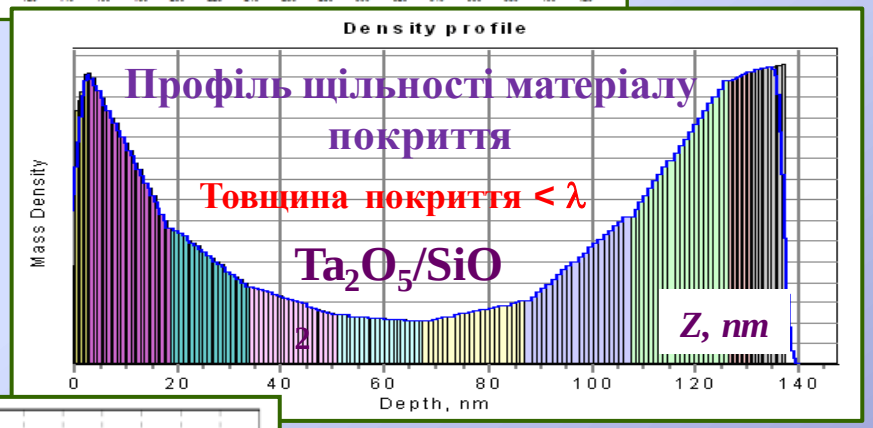
Імпульсний модулятор для МР. *Поставка у ІФ, Чеська АН, Прага, ЧР*

Блоки і системи МР і ТІО

Отримання немонотонного (увігнуто-періодичного) наноградієнтного розподілу складу покриття (на прикладі 1Dz (Gz) фотонного бар'єру)



Центр імпульсного іонно-плазмового (магнетронного) осадження наноградієнтного фотонного бар'єру на базі установки УВН



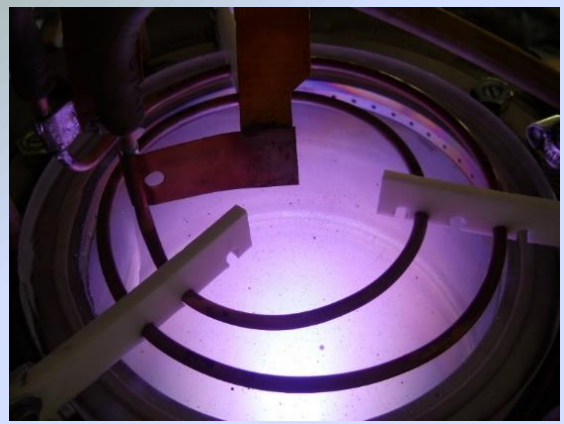
$$n(z) = (1+z/L_1 - z^2/L_2^2)^{-1};$$

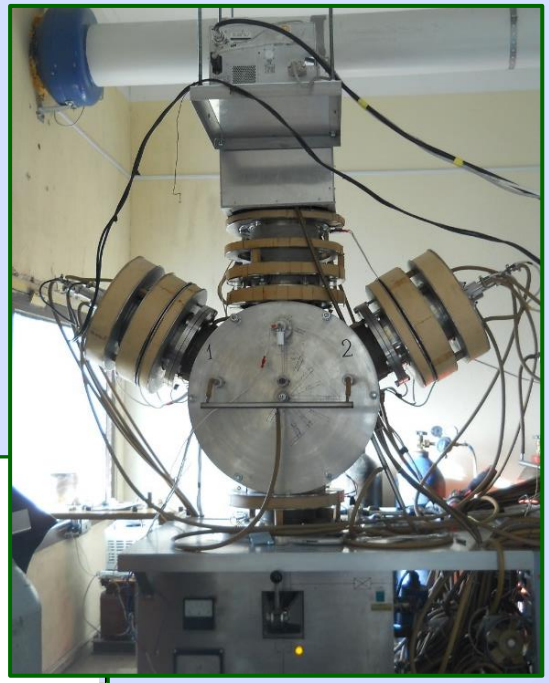
$$n_{min} = (1 + y^2)^{-1};$$

$$L_1 = d/4y^2;\ L_2 = d/2y;$$

$$y = L_2/2L_1$$

Технологічна камера з геліконним джерелом та параметри іонно-плазмового потоку





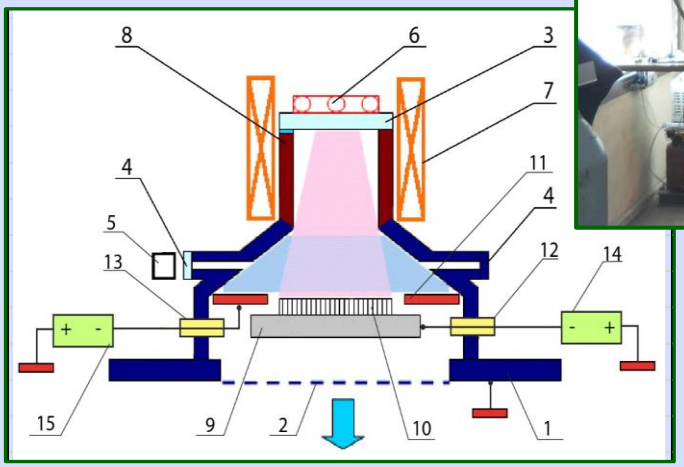
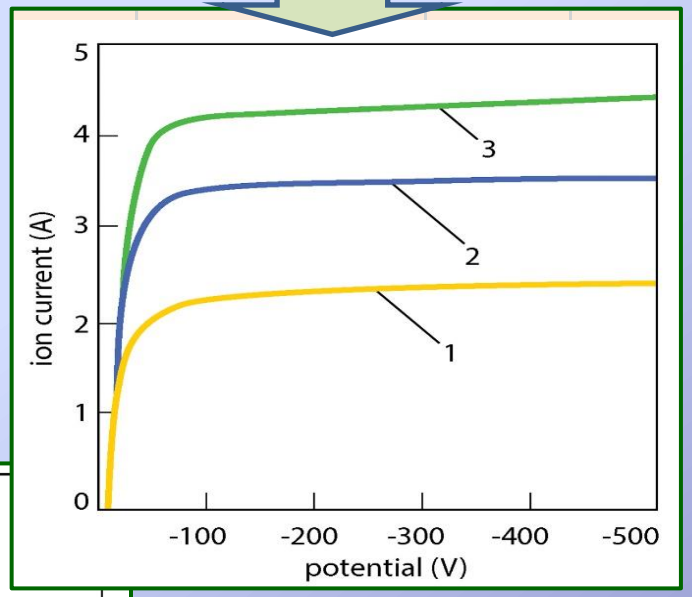
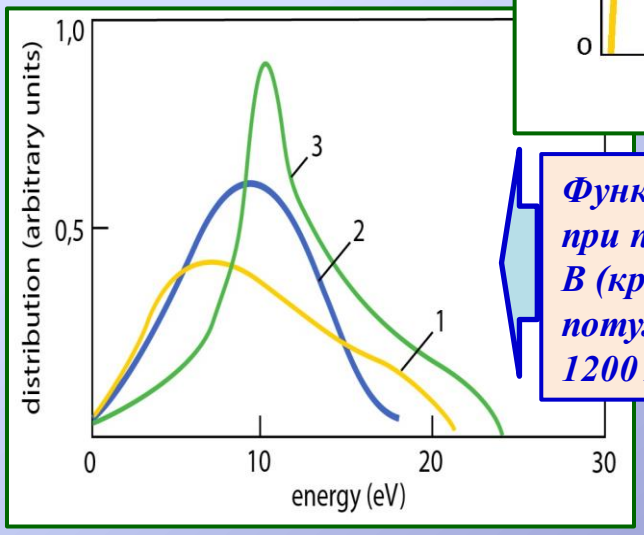


Схема технологічної ваккумної камери:
1-корпус камери, 2-порт насосної системи, 3,4-кварцево вікно і додаткові вікна, 5-спектральний аналізатор, 6-пласка антена, 7-магнітна система, 8-патрубок геліконного джерела, 9-тримач мішені, 10-мішень, 11-діафрагма, 12,13--ізолятори блоку живлення і мішені, 14,15-джерела живлення тримача мішені і діафрагми.

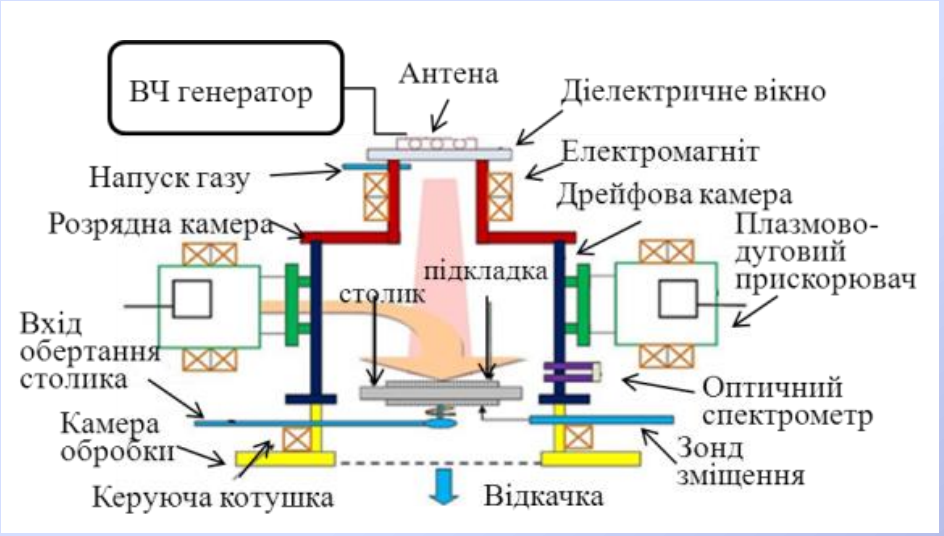
ВАХ тримача мішені для значень потужності геліконного ВЧ розряду 400, 600 і 800 Вт (криві 1, 2, 3)





Функції розподілу іонів за енергіями при потенціалах тримача мішені 50 В (крива 1) і 500 В (криві 2,3). ВЧ потужність 800 Вт (криві 1, 2) та 1200 Вт (3)

Гібридна геліконно-дугова іонно-плазмова установка

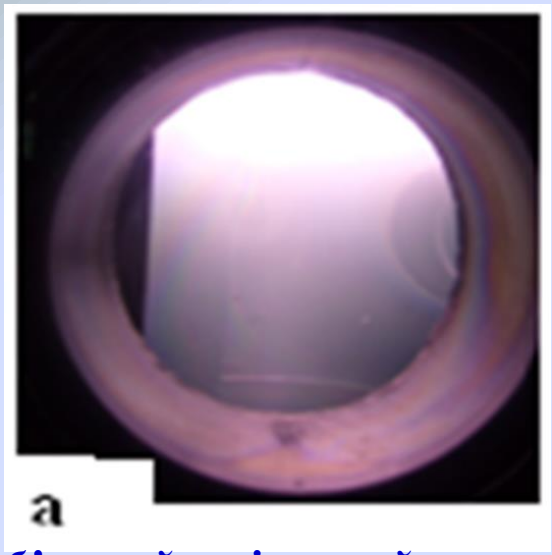


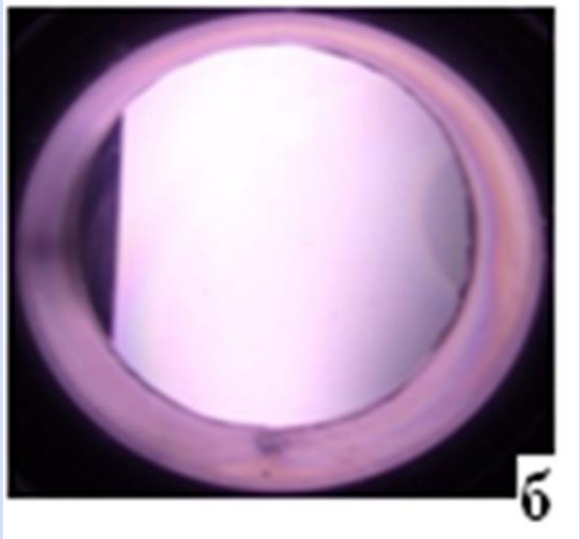
Установка має два сумісних джерела плазми – геліконне і магнітно активоване плазмово-дугове, що дозволяє одночасну їх роботу при синтезі наноструктур (без високотемпературних технологічних стадій; реальна температура підкладки – 70 – 100 ^{0}C).

Установка *не має аналогів у світі* і дозволила:

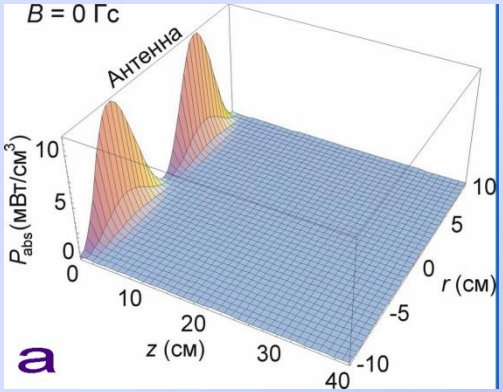
- ***вперше*** **реалізувати нерівноважні низькотемпературні геліконні іонно-плазмові процеси із плазмовими потоками густиною до 10^{12} см$^{-3}$; що на 2-3 порядки вище, ніж для відомих іонно-плазмових джерел;**
- **радикально змінювати структуру поверхні підкладок та *вперше* отримати унікальні наноструктури із керованими розмірами.**

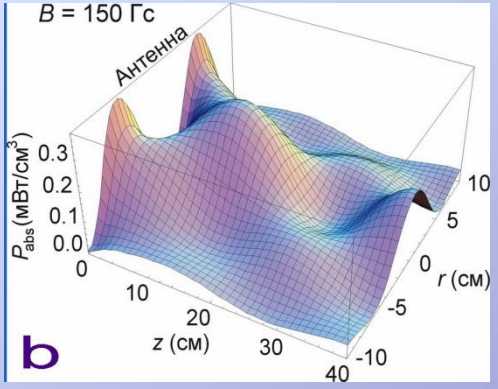
Новий геліконний плазмовий розряд «плазмова колона»





Об'ємний геліконний розряд *Геліконний розряд «плазмова колона»*





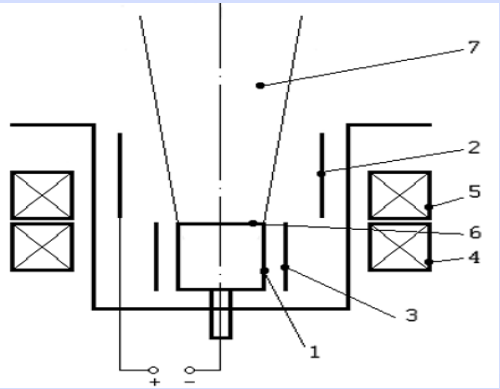
Геліконні хвилі – власні резонансні електромагнітні хвилі замагніченої плазми. **Умови виникнення: Замагніченість електронів Геліконний режим розряду**

$$p[mTorr] < \frac{17,6}{\alpha}\frac{B[Gs]}{T_{eV}[eV]} \qquad p[mTorr] > \frac{6,3}{\alpha}\frac{f[MHz]}{T_{eV}[eV]}$$

Вперше отримано плазмові потоки надвисокої густини – геліконний розряд «плазмова колона», які дозволили кероване створення нового класу наноструктур і модифікацію поверхні твердих тіл на нанорівні.

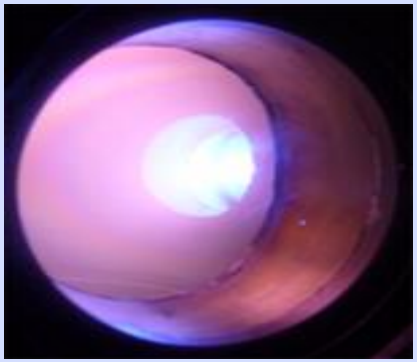
Профілі поглинання ВЧ потужності в плазмі без магнітного поля (ICP-розряд) (a) і в магнітному полі 150Гс (геліконний розряд) (b) при тиску аргону 50 мТорр

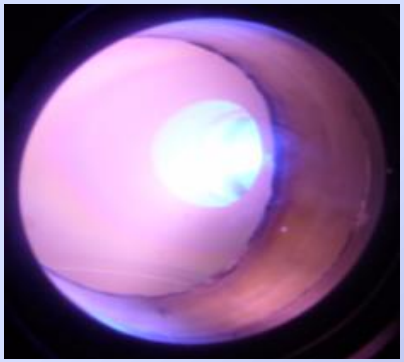
Магнітноактивований плазмово-дуговий прискорювач (ПДП)

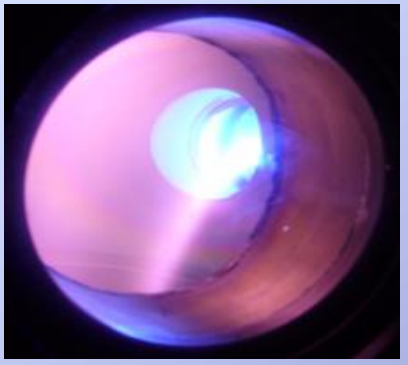


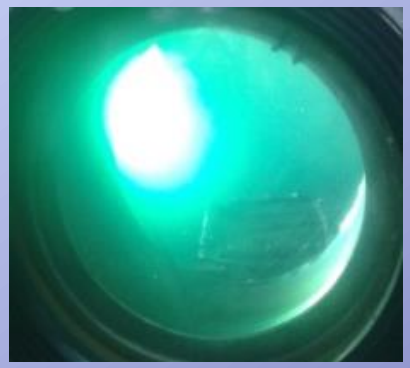
1 – катод;
2 – анод;
3 – екран;
4, 5 – котушки;
6 – робоча поверхня;
7 – потік плазми

Просторове керування плазмовим потоком ПДП для структури TiN і MgO



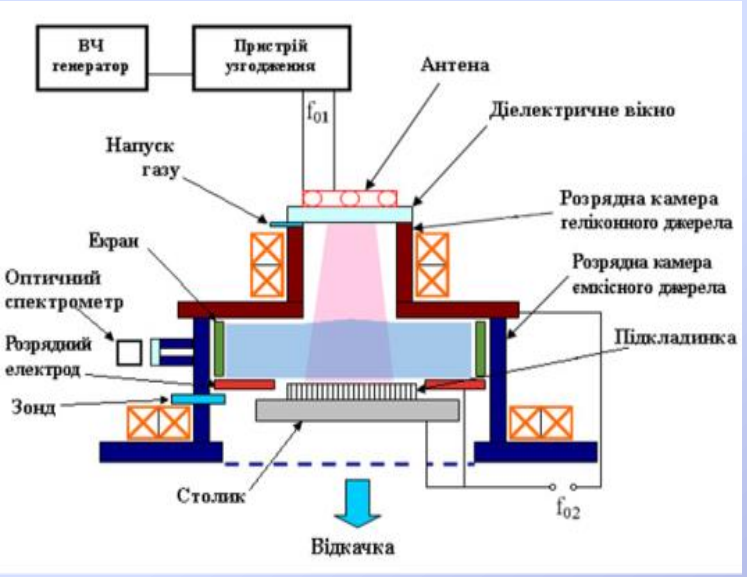






Без повороту Поворот на 70 градусів Поворот на 90 градусів

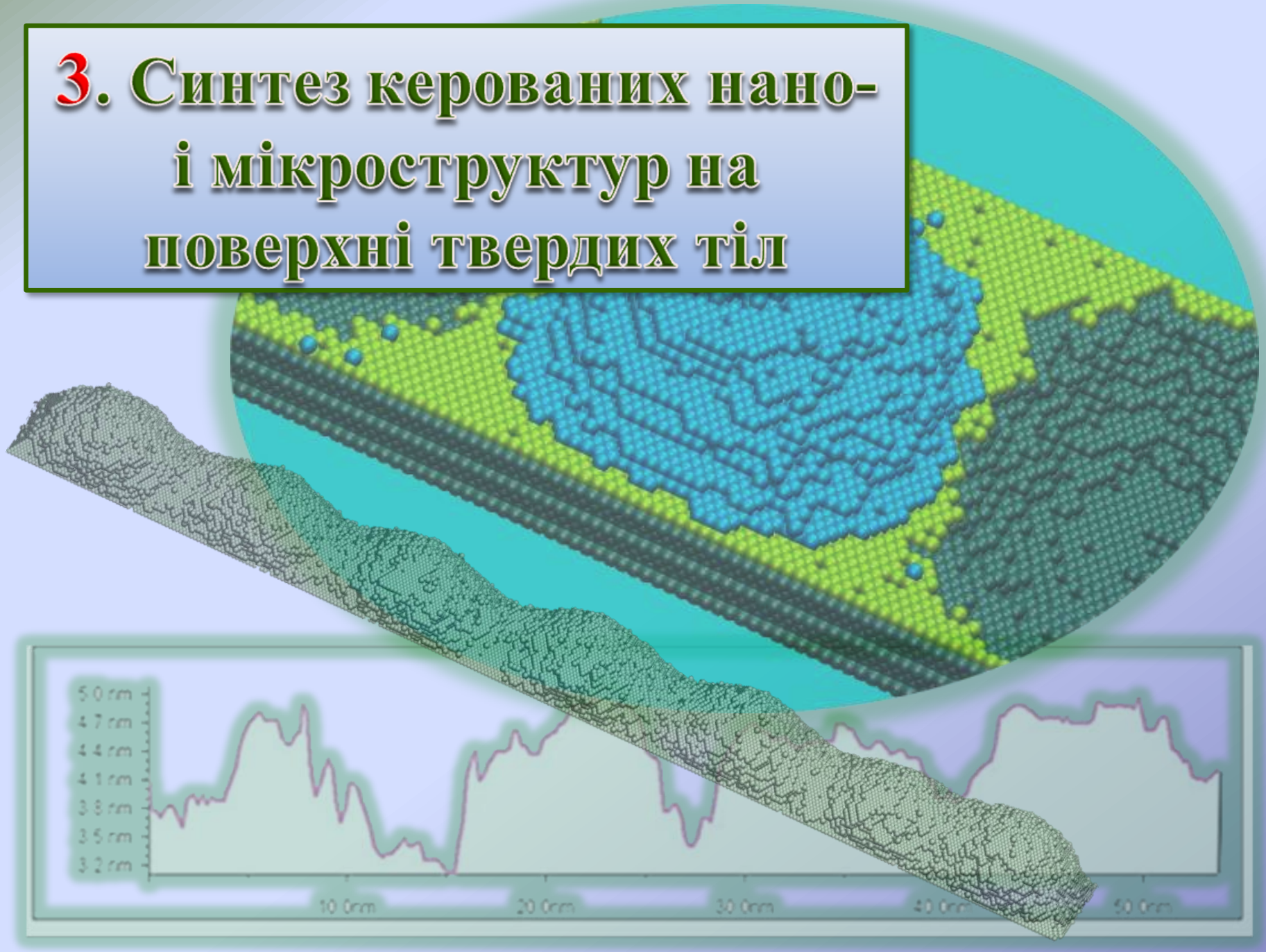
Гібридна установка прецизійного розмірного травлення



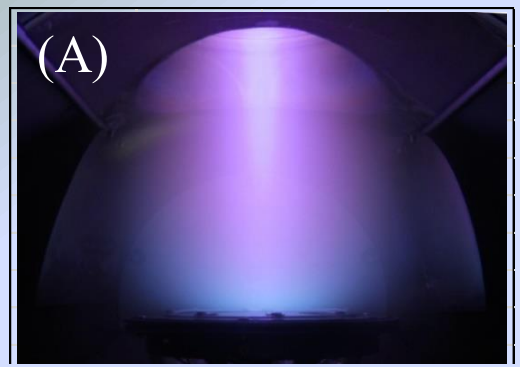
Установка створена на базі двох сумісних джерел ВЧ плазми різної просторової густини - геліконного і ємнісного, що дозволило мати при травлені плазму високої однорідності діаметром до 270 мм на поверхні травлення, що приводить до високої технологічної продуктивності.

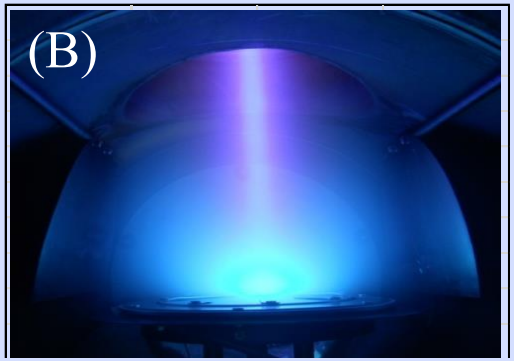
Гібридна установка прецизійного розмірного травлення не має аналогів у світі й завдяки надвисокій густині плазми забезпечує в 10 – 100 разів більшу швидкість дисоціації молекулярних газів та інтенсивність іонних потоків на оброблювану підкладку, ніж у відомих установках.

3. Синтез керованих нано- і мікроструктур на поверхні твердих тіл



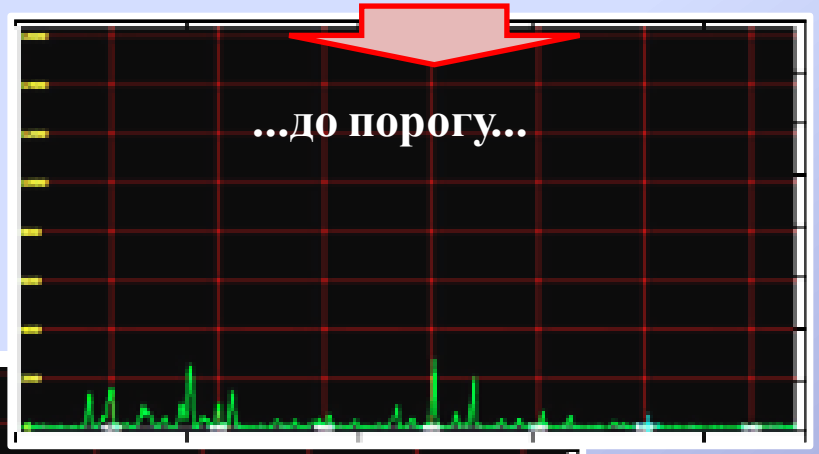
Візуальні прояви переходу через поріг батутного розпилення та спектри випромінювання плазми

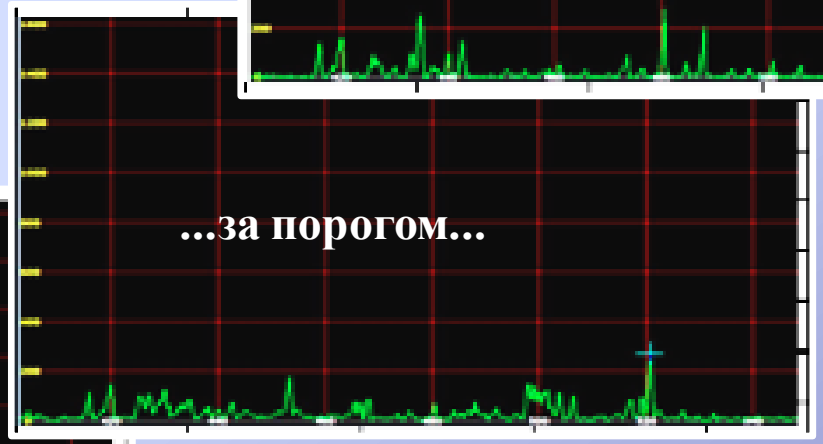


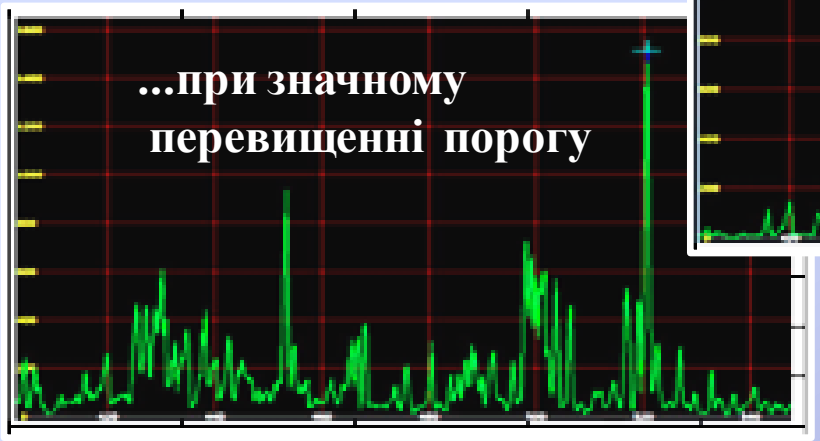


Світіння плазми над алюмінієвою мішенню при потенціалі тримача мішені -70 В (А) та -210 В (В)

Спектри випромінювання плазми за батутного розпілення мішені із хрому...







Ефективність бомбардування мішені іонами Ar^+ у створенні приповерхневих зон сильної напруги й збудженні батутного розпилення

Енергія іонів

Ar^+ *- 0.1-1 кеВ*

Середня глибина ***L***

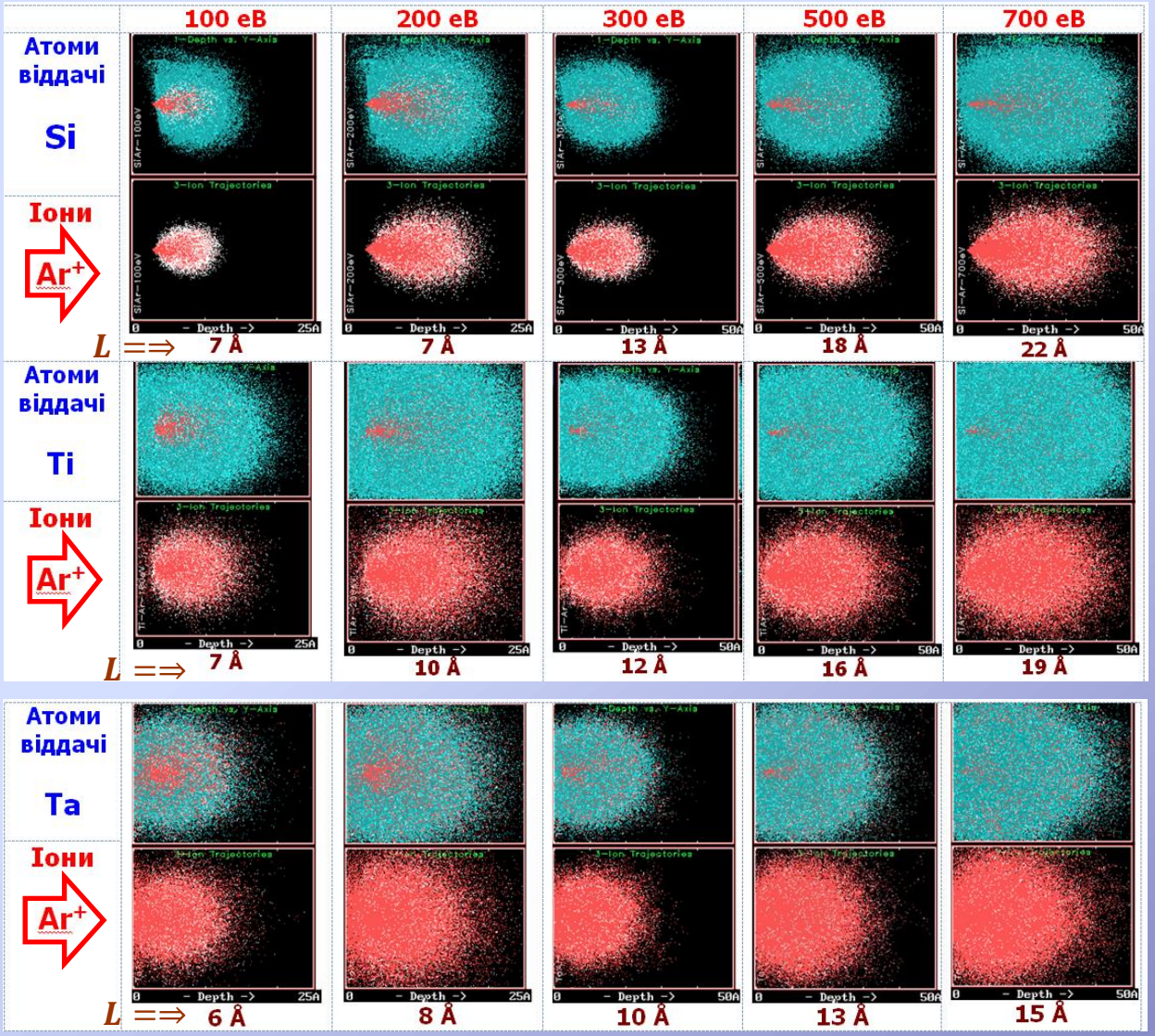
проникнення іонів Ar^+

у **Si** *-мішень* **-7 – 27Å,**

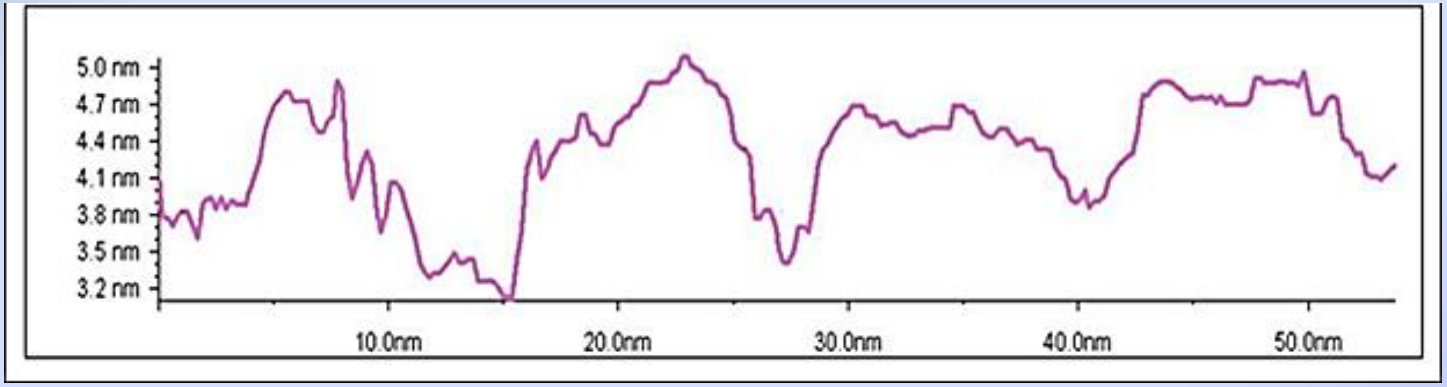
у **Ti** *-мішень* **- 7 – 23Å,**

у **Ta** *-мішень* **- 6 – 20Å.**

Поздовжні перерізи
(відносно напрямку бомбардування)
зон проникнення в мішень іонів
і створених ними
зон сильної механічної напруги



Керований регулярний нанорельєф високої густини на монокристалічному кремнії (Si)

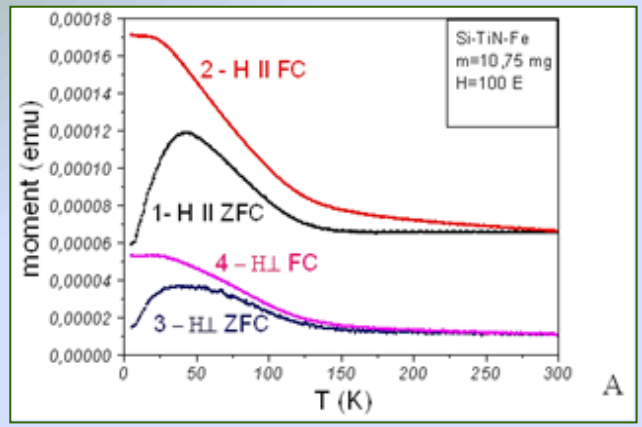


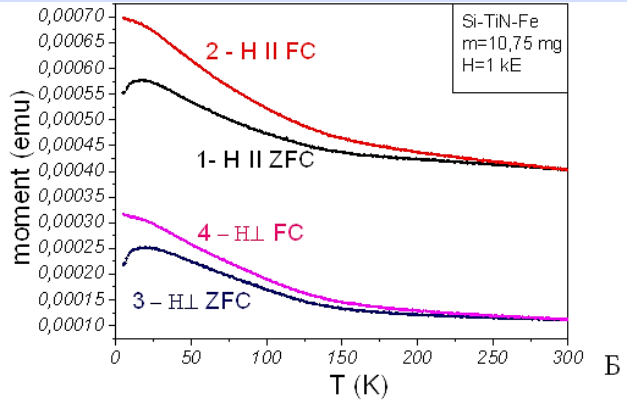
Регулярна наноструктура із кроком ≈12 нм і висотою ≈5 нм поверхні TiN (за даними скануючої тунельної мікроскопії) на монокристалічному кремнії, що отримана в гібридному геліконно-дуговому реакторі, використана для формування функціональних наноструктур високої щільності пакування.

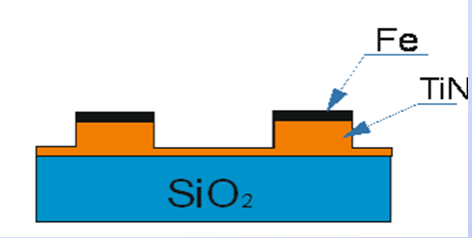
Отримано керовані регулярні наноструктури з розміром від 2 до 50 нм.

Регулярний нанорельєф високої густини, крім самостійного функціонального застосування, може використовуватись для створення керованих наноструктур.

Суперпарамагнетизм наноструктур TiN/Fe, сформованих на регулярному нанорельєфі моно-Si







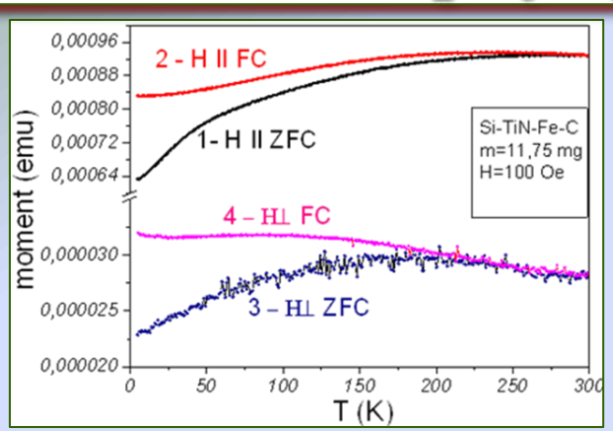
Нанонаноструктура TiN/Fe на регулярному нанорельєфі моно-Si

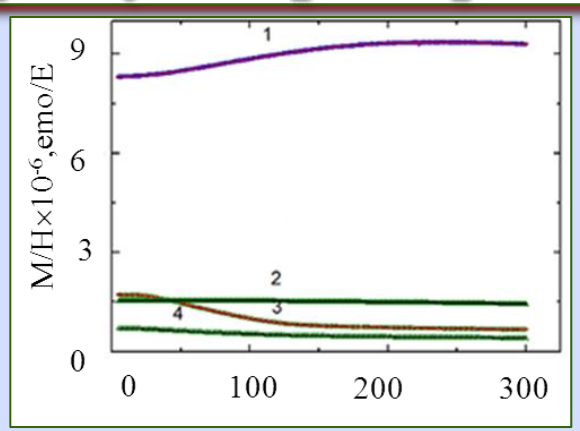
Температурні залежності магнітного моменту $\vec{m}$ наноструктур TiN/Fe на моно-Si, що демонструють явища суперпарамагнетизму й «замороженого суперпарамагнетизму». Магнітне поле (H=100 E (А) і 1000 E (Б)) – паралельне $H_{\parallel}$ (криві 1 і 2) і перпендикулярне $H_{\perp}$ (криві 3 і 4) до поверхні підкладки Si.

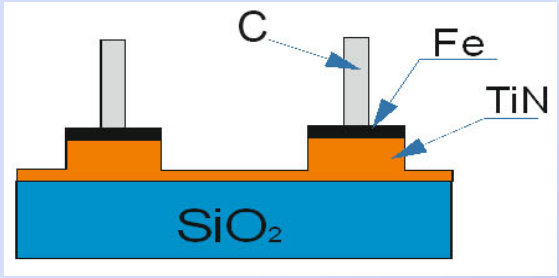
1. **У наноструктурах TiN/Fe виявлено явище суперпарамагнетизму, що виникає при T~150 K, температура блокування $\vec{m}$ T_B= 42,2 K.**
2. **Отримані однодоменні магнітні кластери Fe перебувають у нанокристалічному стані, а їх розмір корелює з розміром керованого вихідного нанорельєфу підкладки моно-Si.**

3. Показано можливість істотного підвищення щільності магнітного запису перспективних систем збереження й обробки гігантських масивів інформації для суперкомп'ютерів.

Магнітні властивості наноструктур TiN/Fe/C, сформованих на регулярному нанорельєфі моно-Si







Температурні залежності магнітного моменту $\vec{m}$ наноструктур TiN/Fe/C, що демонструють суперпара-магнетизм, «заморожений суперпарамагнетизм» та зсув суперпарамагнітної межі до 300 К. H=100 Е – паралельне $H_{\parallel}$ (криві 1 і 2) і перпендикулярне $H_{\perp}$ (криві 3 і 4) до поверхні підкладки Si.

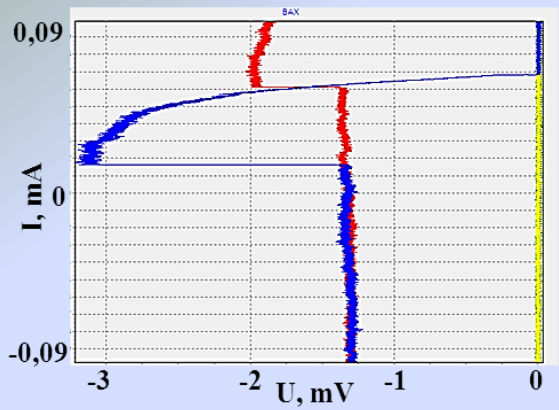
Залежності рівноважних (FC) магнітних сприйнятливостей для TiN/Fe/C (1 і 2) і TiN/Fe (3 і 4) в полях H = 100 Е (1 і 3) і 1 кЕ (2 і 4).
Внесок *наноструктурованого вуглецю C* у величину M/H є *визначальним*

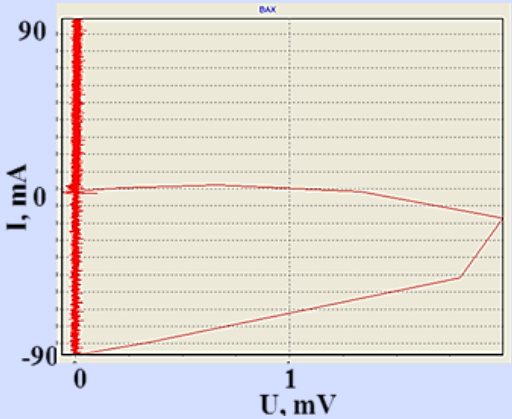
Нанонаноструктура TiN/Fe/C на регулярному нанорельєфі моно-Si, що отримана у PECVD синтезі наноструктур вуглецю (C) на нанокластерах Fe

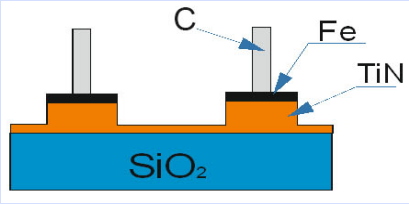
1. Вперше виявлено, що PECVD синтез наноструктурованого вуглецю (C) на магнітних нанокластерах Fe (структура TiN/Fe/C) підвищив температуру блокування (T_B ~ 180-270 К для H=100 Е) і зсунув суперпарамагнітну межу вище 300 К, що вказує на існування суперпарамагнетизму й стійких однодоменних магнітних кластерів при температурах вищих за 300 К.

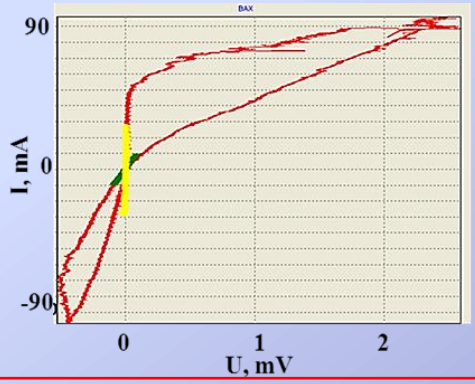
2. Використання вуглецевих наноструктур (структура TiN/Fe/C) дозволяє наблизитися до вирішення проблеми суттєвого підвищення та подолання суперпарамагнітної межі, що дозволить істотно підвищити щільність магнітного запису інформації.

Електричні властивості керованих регулярних наноструктур TiN/Fe/C при кімнатних температурах









Регулярні стани з нульовим диференційним опором на* BAX *наноструктур* TiN/Fe/C *і «Гігантська» провідність (при* V=0*) за кімнатної температури. Провідність ≈ на два порядки вища, ніж у міді. Струм - 100 мА, густина - 1,3·10⁴ А/см².

Реалізовані наднизькі значення опору (R < 10⁻⁵ Ом при кімнатній температурі).

ЕФЕКТ ВИЯВЛЕНИЙ у наноструктурах* TiN/Fe/C*, які (після завершення процесу* PECVD*) оброблялися в плазмі геліконного розряду в режимі «Плазмова колона».

Виникнення «гігантської» провідності інтерпретоване в рамках квантової тунельної резонансно-перколяційної моделі

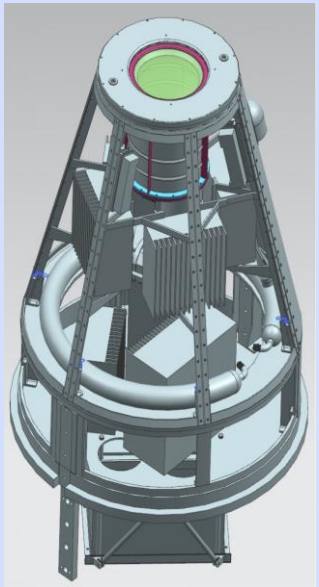
BAX наноструктур* TiN/Fe/C *при кімнатній температурі, які демонструють мемристорний ефект із перемиканням між високоомним (1,3·10⁻² Ом) і низькоомним (3·10⁻⁴ Ом) станами.

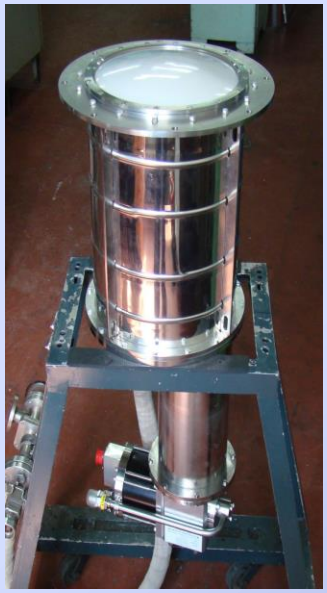
У наноструктурах TiN/Fe/C, (які синтезовані у геліконно-дугових іонно-плазмових процесах (PECVD)), при кімнатних температурах виявлені явища *«ГІГАНТСЬКОЇ» ПРОВІДНОСТІ* (*R* < 10⁻⁵ Ом), а також *МЕМРИСТОРНОЇ* поведінки BAX.

Для зменшення помітності військових об’єктів і персоналу в інфрачервоному («тепловому») діапазоні спектру створено дослідні зразки функціональних елементів із покриттями на основі наноструктурованих іонно-плазмових конденсатів (ІПК), що забезпечують зменшення ймовірності виявлення цих об’єктів і персоналу тепловізійними пристроями.

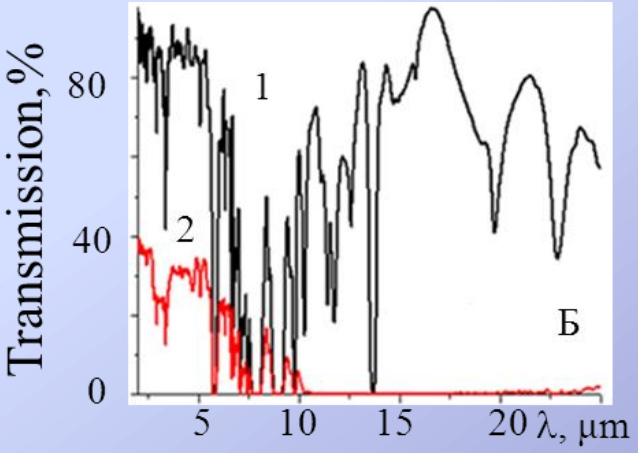
Створено квазіоптичні мультидіапазонні ІЧ-фільтри для захисту надчутливих кріогенних приймачів від термоударів та фонового теплового випромінювання довкілля.

Квазіоптичні мультидіапазонні фільтри (КОФ) для надчутливих кріоелектронних приймальних систем оснащення малих антен новітньої міжнародної мережі радіоінтерферометрії із наддалекою базою (РІНДБ)





Станція РІНДБ і її фокальний кріогенний приймальний модуль (ПАТ «НВП «Сатурн»).

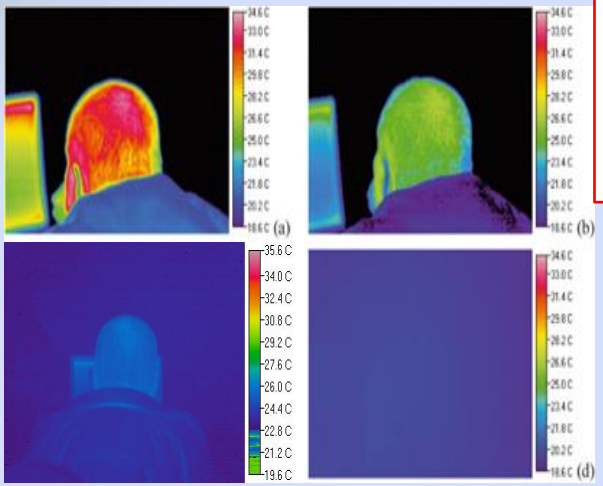


Характеристики ІЧ-пропускання для тефлонової плівки (товщина *d*=220 мкм) (1) і структур ІПК/тефлон (товщина ІПК *d*=15 мкм) (2) для КОФ фокального кріогенного приймального модуля

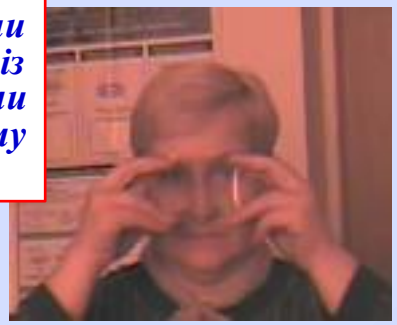
Створені* КОФ *на основі композиційних структур* ІПК *забезпечують радіопрозорість до інформативних вхідних сигналів в мікрохвильовому (1-36 ГГц) діапазоні та загородження від термоударів і фонового теплового випромінювання довкілля в інфрачервоному діапазоні

Виявлено явище ефективного блокування ІЧ (теплового) електромагнітного випромінювання

«ІЧ (ТЕПЛОВІ) НЕВИДИМКИ» - маскувальні функціональні структури (МФС) «іонно-плазмові конденсати (ІПК) на тонких прозорих полімерних плівках»



Тепловізійне зображення людини за ПК без МФС та із кількома типами прозорих у видимому діапазоні МФС



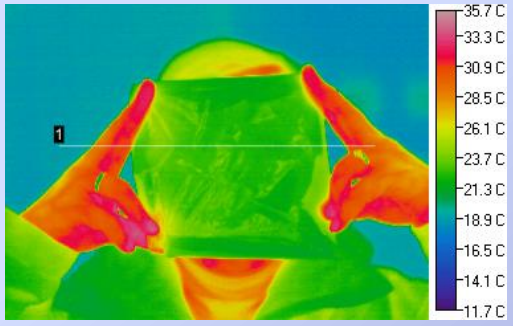
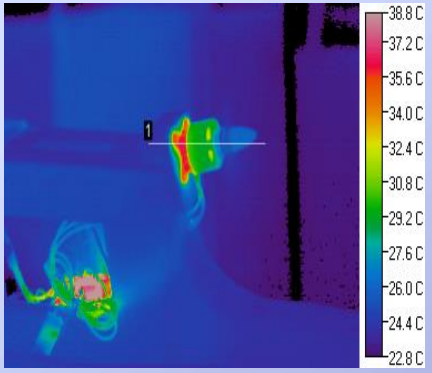
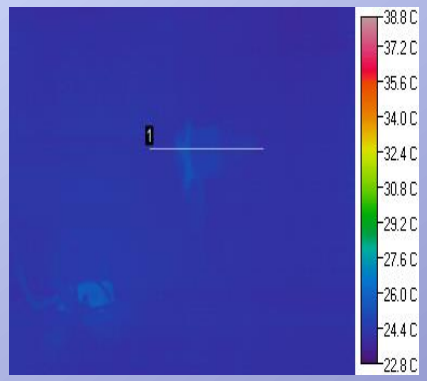


Фото і Тепловізійне зображення людини, обличчя якої заховане за прозорою у видимому діапазоні МФС

Закладено фізико-технічні засади створення пристроїв ІЧ, ТГц і субміліметрового діапазонів на гнучких термолабільних підкладках (в т.ч. із хімічно інертних матеріалів)



Тепловізійне зображення БПЛА без МФС (при 30% потужності двигуна)



Тепловізійне зображення БПЛА із МФС (при 30% потужності двигуна)

Тепловізор «Mikron M7800»

ІЧ (теплові) маскувальні функціональні екрани (МФЕ) ІПК на металевій основі «ТЕПЛОВІ НЕВИДИМКИ» («IR-STEALTH»)

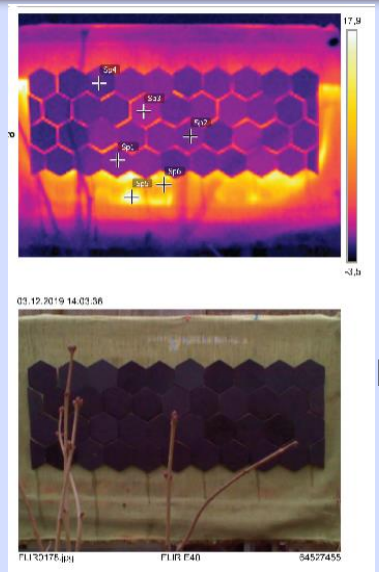


Рис. 1.7

Тепловий стенд (ТС) при натурних випробуваннях в зимових умовах. Температура ТС + (26 - 35) ^{0}С.

Маскування нагрітого об'єкту (ТС) МФЕ (закрито частину ТС) при натурних випробуваннях (відстань до об'єкту 2, 4, 8 м). Верхній ряд – фото в ІЧ діапазоні. Температура повітря - +1 ^{0}С, грунт – (-4 ^{0}С). Температура маскувального функціонального екрану (– (0,7 – 2,2) ^{0}С) – основний «демаскуючий ефект» об'єкту створює частина ТС без МФЕ. (Тепловізор FLIR 40E)

Тепловий образ бойової машини на базі колісної платформи «Бумеранг», який демонструє дуже високий рівень помітності об'єкту в ІЧ діапазоні.

Тепловий образ авто із створеним МФЕ. Температура МФЕ на працюючому двигуні 2-6,3 ^{0}С, на двигуні без МФЕ – 16,2-19,5 ^{0}С, т-ра фону -1,8 -2,1 ^{0}С.

Створені експериментальні зразки маскувальних функціональних екранів із покриттями на основі іонно-плазмових конденсатів дозволили зменшити ІЧ (тепловий) контраст у 8-20 разів, що приводить до критичного зменшення помітності військових об'єктів в ІЧ діапазоні спектра. Використання створених у роботі МФЕ приведе до практично мізерної доцільності використання противником авіації і високоточної зброї для виявлення і знищення замаскованих об'єктів, що підтверджує критичну значущість нашої роботи.

ДИПЛОМ

ПЕРШОГО СТУПЕНЯ

нагороджується

колектив авторів: Сизов Ф.Ф., Цибрін З.Ф., Вуйчик М.В., Свеженцова К.В., Короташ І.В., Руденко Е.М., Полоцький Д.Ю.

переможців Всеармійського конкурсу "Кращий винахід року" у номінації "Матеріально-технічне забезпечення"

Патент України № 118901

Начальник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України генерал-майор Ігор ЧЕПКОВ

"___" листопада 2019 року

Для ***відомих розробок зменшення контрасту*** в тепловому діапазоні за рахунок маскувальних комплексів склало ***2-3 рази***. Застосування відомих засобів зниження теплової помітності призводить до ***зменшення дальності виявлення*** наземних або розміщених на землі зразків ОВСТ в ***1,5-2 рази***, при цьому середній ***час виявлення цілей збільшиться*** більш ніж в ***1,5 рази***, що суттєво підвищує ймовірність знищення літака (гелікоптера, ударного БПЛА) противника нашими ЗРК. Високоточні боєприпаси (вартість деяких моделей більше 100 тис. доларів) можна застосовувати тільки при достатньо високій ймовірності виявлення цілей. Найвигідніша ймовірність виявлення цілі ***0,8***, а якщо цей показник комплекс маскування зменшує мінімум ***в 1,5 рази***, то ***високоточна зброя стає неефективною***.

1. Переможці Всеармійського конкурсу «Кращий винахід року» (2019 рік).

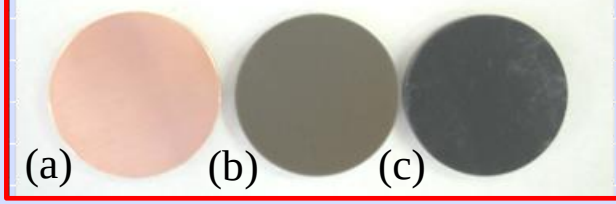
2. Виставки «Наука – обороні та безпеці держави» 2016, 2018 рр.

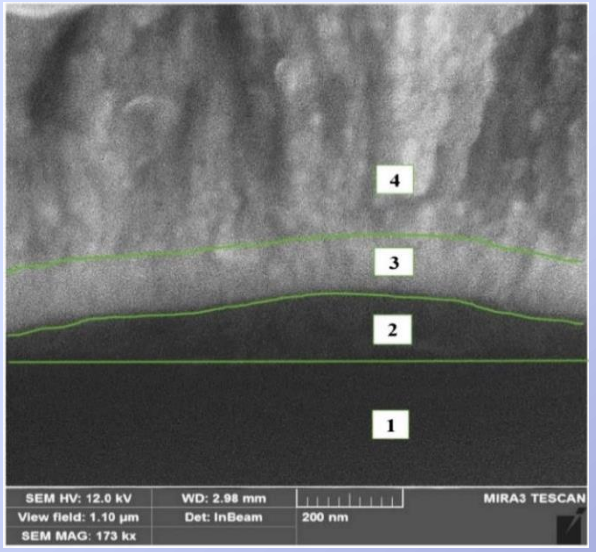
3. НДР за цільовою науково-технічною програмою НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави».

Батутне структурування поверхні та виникнення високої адгезії внаслідок взаємного проникнення наноструктур підкладки та матеріалу мішені із відтворенням в плівці складу багатокомпонентного матеріалу мішені

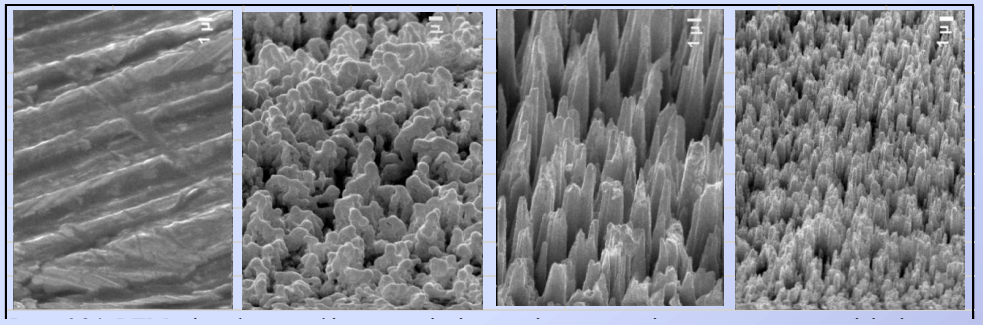
Батутне розпилення є процесом викидання великих фрагментів поверхневих шарів матеріалу під дією щільного іонного потоку з невеликою енергією ≤ 100 еВ внаслідок кулонівського відштовхування між цими фрагментами та об'ємом кристалу. Причиною порогової появи батутного режиму є збільшення за порогом частки розірваних між-іонних зв'язків внаслідок іонізації верхніх шарів мішені.

***Фотографії поверхні міді до* (a) *і після* батутного розпілення- (b),(c)**





РЕМ мікрофотографії поверхні мідних мішеней за різних значень енергії іонів та початкової температури

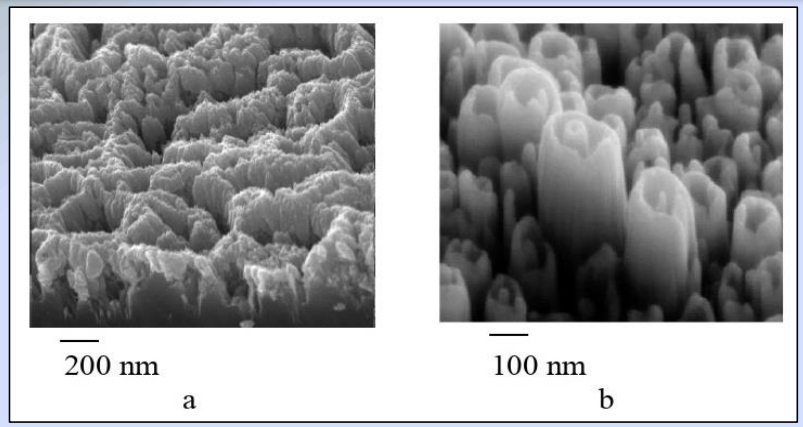


Червона мідь | Коричнева мідь | Чорна мідь

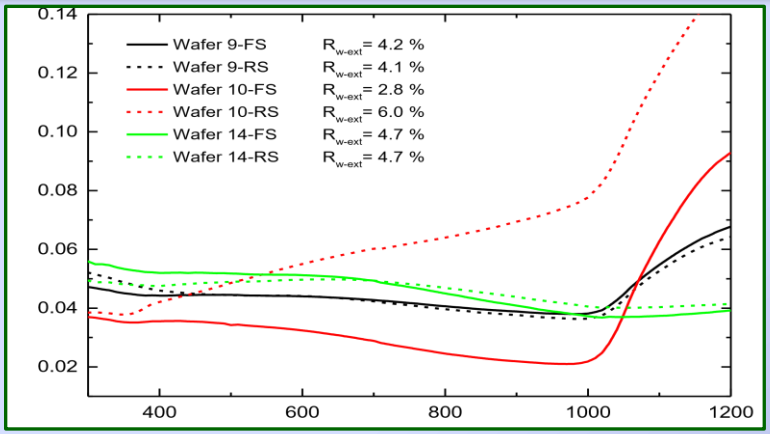
СЕМ зображення сколу пластини монокристалічного кремнію з наноструктурованою поверхнею та нанесеною плівкою хромонікелевої неіржавіючої сталі.

Елемент	Зона 1, вагові %	Зона 2, вагові %	Зона 3, вагові %	Зона 4, вагові %	Мішень вагові %
Si	100,00	91,46	18,38	0,85	1,44
Fe		5,96	60,03	71,85	70,71
Cr		2,58	15,52	18,02	18,89
Ni			5,78	8,95	8,65
Ti			0,29	0,33	0,31
Всього	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

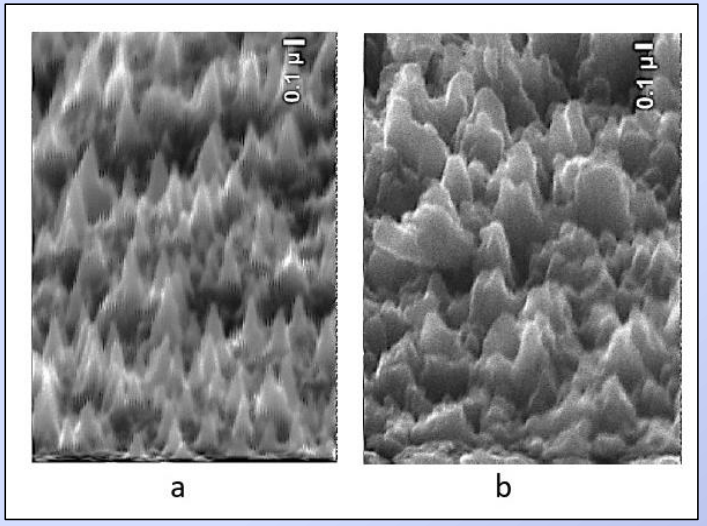
Варіанти проявів дворівневої ієрархічної структури та її вплив на властивості опроміненої поверхні й покриттів

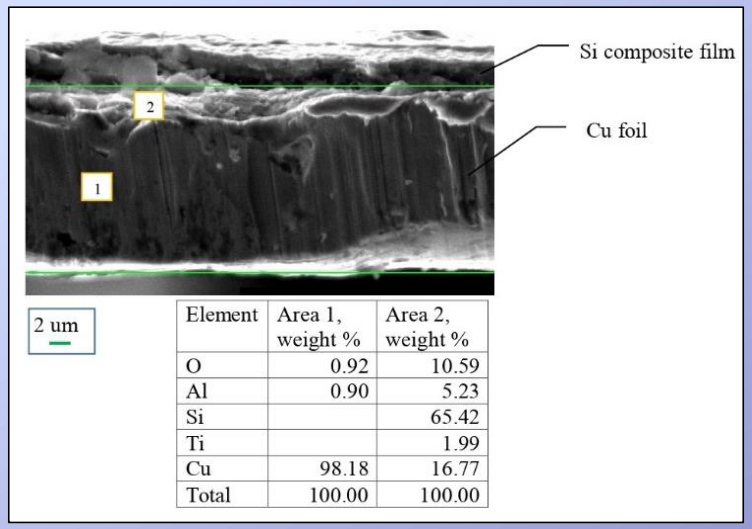


Дворівнева структура з нанорозмірною модуляцією субмікронних утворень (a) *та трубчаста субмікронна структура з вбудованими елементами нанорозмірного масштабу* (b).



Структура (b) *забезпечує мінімальний коефіцієнт відбиття світла (до 2,8 %) від поверхні монокристалічного кремнію (пластина № 10, червона крива).*





Element	Area 1, weight %	Area 2, weight %
O	0.92	10.59
Al	0.90	5.23
Si		65.42
Ti		1.99
Cu	98.18	16.77
Total	100.00	100.00

Нанорозмірна текстура поверхні мідної фольги (a) *забезпечує сильну адгезію кремнієвої композитної плівки із вмістом більше 65 % кремнію. За субмікронної структури* (b) *сильна адгезія відсутня.*

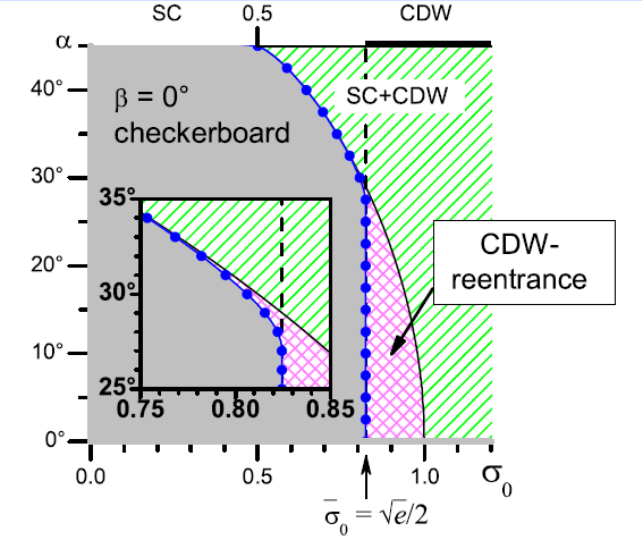
4. Нові принципи надпровідної електроніки та спінтроніки й створення пристроїв на цій основі

Надпровідники з хвилями зарядової густини. Теорія та експеримент

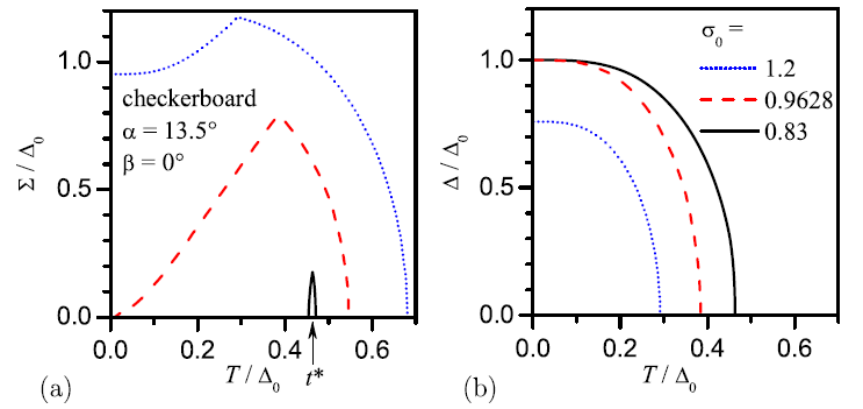
Запропоновано низку моделей. Розраховані фазові діаграми, термодинамічні властивості, тунельні квазічастинкові та джозефсонівські струми.

Основним об'єктом були обрані високотемпературні купрати. Для них проводились експерименти з розломними переходами (break junctions) та методом скануючої тунельної мікроскопії (Hiroshima university разом із Інститутом фізики НАНУ).

Написано декілька оглядів на тему, які стали стандартом при посиланнях у цій царині досліджень.

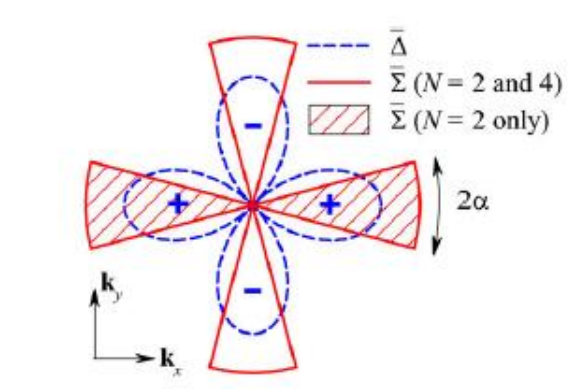


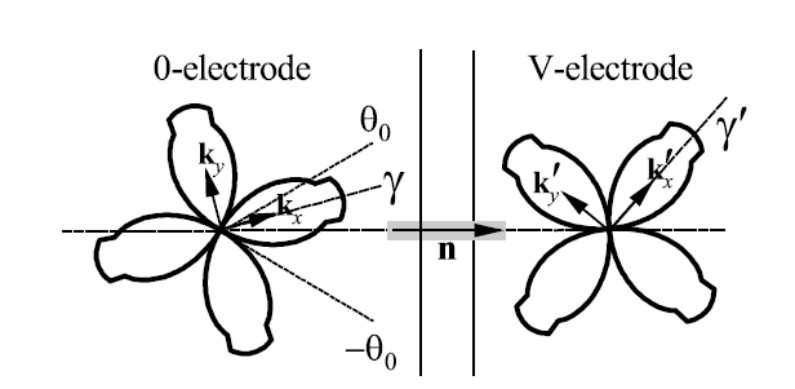
Фазова діаграма



Передбачені зникнення та повторна поява хвиль зарядової густини за рахунок конкуренції з куперівським d-спарюванням.

Тунельні квазічастинкові струми



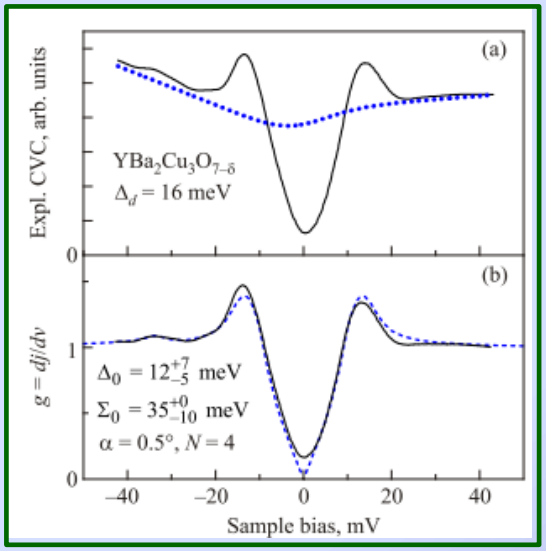


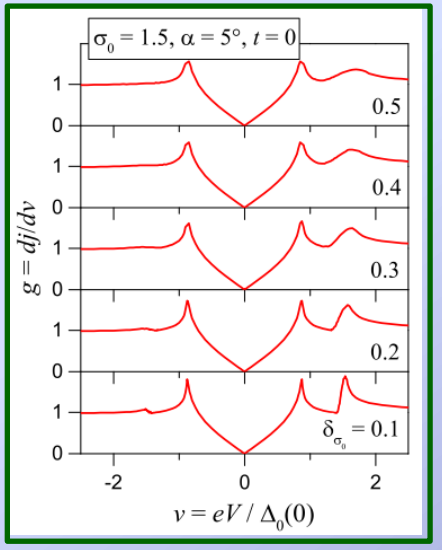
Надпровідний та діелектричний параметри порядку в площині ab-кристала.

1. Вплив неоднорідності одного з параметрів порядку (надпровідного та діелектричного) на розмивання характерних особливостей ВАХ, які визначаються як самими параметрами порядку, так і їхніми комбінаціями.

2. Встановлена вирішальна роль параметра напрямленості тунелювання.

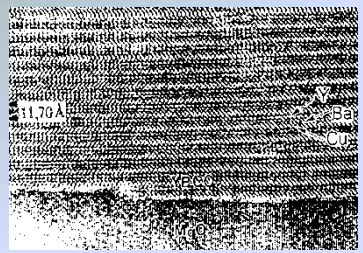
3.Застосування теорії до реальних експериментальних даних (власних і літературних).



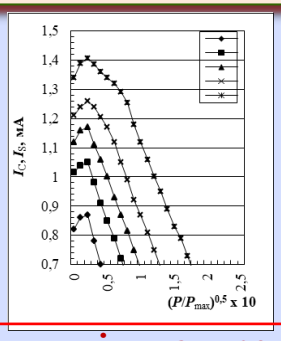


Отримані результати дозволяють стверджувати про співіснування надпровідності та хвиль зарядової густини.

Квазімонокристалічні плівки ВТНП YBCO синтезовані в іонно-плазмових процесах



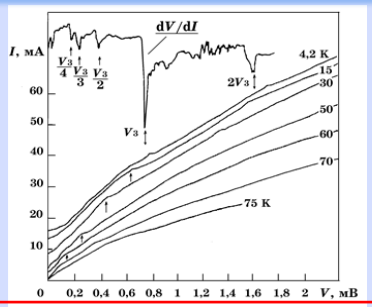
Структура плівки YBCO на підкладці (001) MgO. Період атомарних площин - 11,7 Å. (ПЕМ Philips CM 30).



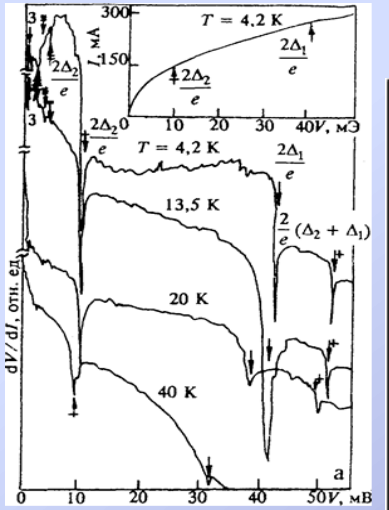
Стимуляція надпровідності у YBCO під дією НВЧ (37 ГГц) при напрузі: 1 – V=0, 2 – V = 0,1 мВ, 3 – V = 0,25 мВ, 4 – V = 0,5 мВ, 5 – V = 1 мВ.

ГІС BANDPASS фільтрів дециметрового діапазону на основі плівок ВТНП YBCO для жорстких умов експлуатації

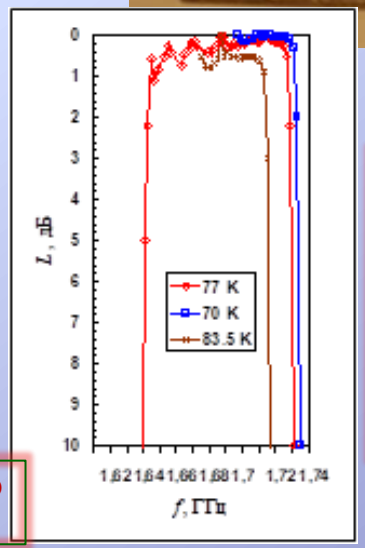
Субгармонійна структура енергетичних щілин $2\Delta_1$ і $2\Delta_2$ і особливості V_3 ВТНП YBCO



dV/dI і ВАХ при зміні температури і напругах << (Δ_2 і Δ_1)/e для YBCO. V_3 = 0,76 мВ



ВАХ і $dV/dI(V)$ при різних температурах ($2\Delta_2/3e$, $2\Delta_2/4e$ - - елементи СГС $2\Delta_2$, $2\Delta^*_3/e$ - 3).



Участь у "Hannowermesse-2006 і 2008" (ФРН);

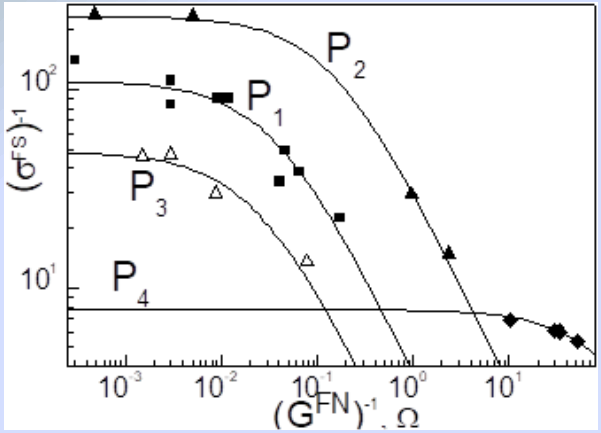
Виставці інноваційних технологій України в Чикаго (США) (2006);

Медаль 5 Міжнародного форуму "OPTICS-EXPO 2009"

Виявлено кореляцію температурної поведінки критичного струму $I_C(T)$ ММС і напруги особливості $V_3(T)$

Методи і елементи надпровідникової спінтроніки (superspintronics)

Явище гігантського спінового блокування тунельного струму в контактах F-I-S



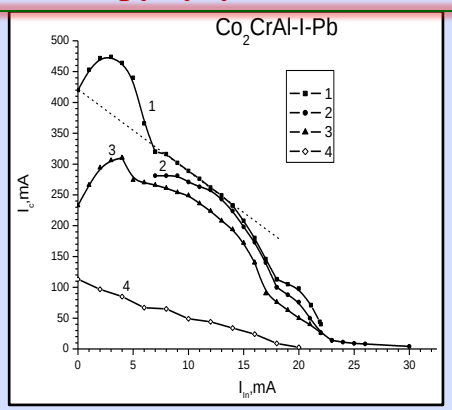
Експериментальні залежності (при T = 4,2 К) нормованої провідності $(\sigma^{FS})^{-1}$ від провідності у нормальному стані $(G^{FN})^{-1}$ для ТК Co_2CrAl-I-Pb (квадратики), $Co_2(Cr_{0,6}Fe_{0,4})Al$-I-Pb (трикутники), Fe-I-Pb (ромбики) та розрахункові (суцільні лінії) для ступеня спінової поляризації p_1=0,97, p_2=0,98, p_3=0,93, p_4=0,40 і коефіцієнта рекомбінаційної спінової деполяризації $\theta \sim (G^{FN})^{-1}$.

Ступінь спінової поляризації p тунельного струму інжекції визначається за формулою:

$$\sigma^{FS}(p,T) = (1 - p^2(1-\theta))\sigma^{NS}(T)$$

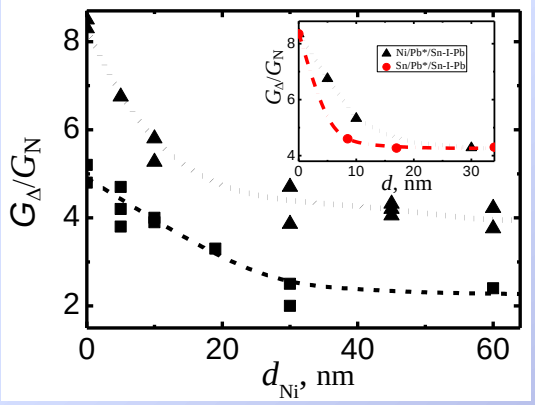
де σ^{NS} - фундаментальна нормована провідність Гіавера σ^{NS} контакту N-I-S-типу.

Явище стимуляції надпровідності під дією спін-поляризованого струму у ТК F-I-S



Стимуляція критичного струму мікромістка Pb під дією тунельної інжекції струму з високим ступенем спінової поляризації (T=4,2 К). Інжектор напівметал сплав Гойслера (СГ) Co_2CrAl.

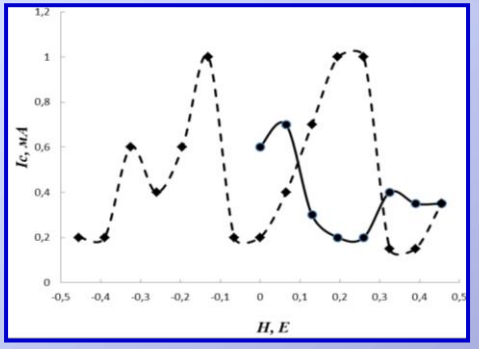
Зворотний ефект близькості далекої дії у ТК F/S*-I-S



Вплив товщини плівки Ni d_{Ni} на величину G_Δ/G_N. На вставці ефект заміни Ni на плівку Sn. G_Δ - динамічна провідність ТК у надпровідному стані при напрузі V^*, G_N – динамічна провідність у нормальному стані. $V^* = (\Delta_{Pb^*/Sn}+\Delta_{Pb})/e$. T = 4,2 К.

Експеримент вказує на взаємну *конверсію спін-синглетного і спін-триплетного упорядкування* на F/S інтерфейсі.

0-π-контакт Джозефсона SFIS-типу на основі напівметалу - сплаву Гойслера Ni_2MnGa



Виявлено явище і створено 0-π ДК в наноструктурах MoRe-Ni_2MnGa-I-Pb/Sn SFIS-типу із прошарком із магнітного СГ Ni_2MnGa. 0-π ДК створено як для надтонкої полікристалічної плівки Ni_2MnGa, так і для квазіаморфної плівки Ni_2MnGa

СТАТИСТИЧНІ ДАНІ

- *Кількість основних публікацій, включених в роботу: 263, у тому числі 8 монографій (4 видані за кордоном), 19 розділів у колективних монографіях та трудах конференцій, 180 журнальних статей (з них 67 у англомовних журналах квартіля Q1 та 38 у англомовних журналах квартіля Q2)*

- *Отримано 56 патентів України і міжнародних патентів.*

- *Загальна кількість посилань на публікації авторів (включених в роботу)/h-індекс роботи, згідно з базами даних, складає відповідно: Web of Science – 1746/22, Scopus – 1958/24, Google Scholar – 2468/26. За даною тематикою захищено 7 докторських та 22 кандидатські дисертацій. Зроблено 5 впроваджень (одне в Чеській Республіці).*

Результати роботи:

- *представлені на Міжнародній виставці-ярмарку «Hannowermesse-2006 і 2008» (ФРГ), Виставці інноваційних технологій України в Чикаго (США), 6 і 7 Ізмірському міжнародному ярмарку (2007, 2008) (Туреччина);*

- *Медаль 5 Міжнародного форуму «OPTICS-EXPO 2009» (РФ);*

- *Переможці Всеармійського конкурсу «Кращий винахід року» (2019).*