

## РЕФЕРАТ

Робота: «Фізичні засади формування низькорозмірних систем із урахуванням взаємодії частинок та створення інноваційного вакуумно-технологічного обладнання з плазмовими потоками надвисокої густини»

### Автори:

1. Войтенко Олександр Іванович
2. Габович Олександр Маркович
3. Горшков В'ячеслав Миколайович
4. Короташ Ігор Васильович
5. Кузьмичев Анатолій Іванович
6. Руденко Едуард Михайлович
7. Семенюк Валерій Федорович
8. Семенюк Надія Іванівна

### 1. ВСТУП.

Сучасна наука та техніка потребує й безперервно отримує нові матеріали, котрі задовольняють вимогам сьогодення та перспективного розвитку різних галузей виробництва, побутових умов існування людства, охорони довкілля й завданням національної оборони. Властивості цих матеріалів та їх функціонування залежать від впливу таких зовнішніх чинників як електромагнітне випромінювання, потоки електронів або іонів.

Оскільки взаємодія зовнішніх потоків із металічними, напівпровідниковими, діелектричними, полімерними мішенями відбувається через їхню поверхню, то вивчення цієї поверхні, її особливостей та способів взаємодії випромінювання та заряджених частинок із поверхнею стає найважливішою задачею для дослідників. Ще великий Майкл Фарадей у «домолекулярну» епоху зрозумів та наголосив на прикладі води-льоду, що будова й властивості поверхні відрізняються від таких для об'єму речовини. Як стало відомо пізніше та, зокрема, підтверджено результатами даної праці, за нерівноважних умов взаємодії із зовнішніми факторами, поверхневі шари твердого тіла здобувають додаткову нестійкість стосовно емісії окремих частинок і цілих фрагментів. Експерименти, котрі досліджують розпилення поверхні та її текстурування під дією іонних потоків, становлять суттєву частку даної сукупності праць, представлених у поданій роботі.

Взаємодія відбувається на атомно-молекулярному нанорівні. Це відомо давно та лежить, зокрема, в основі такого важливого для науки й практики явища, як хімічний каталіз. Хоч елементарні хімічні реакції часто відбуваються завдяки втручання окремих атомів каталізатора, загальні результати є не тільки цілком макроскопічними, але й величезними за наслідками та обумовлюють існування цілих галузей промисловості. Дослідження елементарних процесів на належному мікроскопічному теоретичному рівні є важливою складовою даної роботи. Без досягнення розуміння про те, що відбувається на атомно-молекулярному рівні, годі й сподіватися на усвідомлене, цілеспрямоване та плідне за результатами дослідження макроскопічної взаємодії зовнішніх потоків

частинок або електромагнітного випромінювання з конденсованими фазами речовини.

Для розуміння базових (тобто, з одного боку, основних, а з іншого боку, визначальних) процесів необхідно докладно вивчати закони взаємодії (1) між частинками самої поверхні, (2) сторонніх частинок між собою поблизу поверхні та (3) частинок із поверхнею. При цьому, зокрема, необхідно враховувати кулонівську взаємодію там, де частинки є зарядженими або мають сталий чи наведений електричний дипольний момент. Цей аспект також детально досліджується в циклі праць, представлених у роботі.

Всі результати, які містяться в роботі, були опубліковані в провідних англійських міжнародних та українських джерелах. Отримана низка патентів на технічні винаходи, які зроблені на підставі проведених авторами фізичних досліджень і складають невід'ємну частину поданих матеріалів.

Коллективна праця, представлена для оцінювання, містить низку складових теоретико-фізичного, експериментального та технічного гатунку. Створено нове експериментальне устаткування, яке дозволяє розпилювати твердотільні мішені, суттєво модифікуючи їхні властивості. Зокрема, використовуються магнетронне та геліконне джерела плазми, котрі формують іонні потоки, які, в свою чергу, бомбардують металічні, напівпровідникові та діелектричні зразки. Таким чином, вдалося досягти ефективних швидкостей розпилення, котрі на порядок відрізняються в кращий бік від результатів, отриманих у наразі діючих промислових установках. В процесі досліджень вдалося знайти, ідентифікувати та використати новий батутний механізм розпилення. Завдяки цьому механізму були знайдені можливості створювати шорсткі поверхні з високою адгезивною здатністю.

Сукупність праць, присвячена теоретичному дослідженню кінетики елементарних процесів кристалізації, утворенню нанокластерів та наностовпчиків, доповнює дослідження, про які йшлося вище. Застосовується могутній метод Монте-Карло, що надає можливість розглядати цілком реальні задачі фізики багатьох частинок. Там, за допомогою теоретичного «мікроскопу» розглядаються покрокові процеси, що формують поверхню.

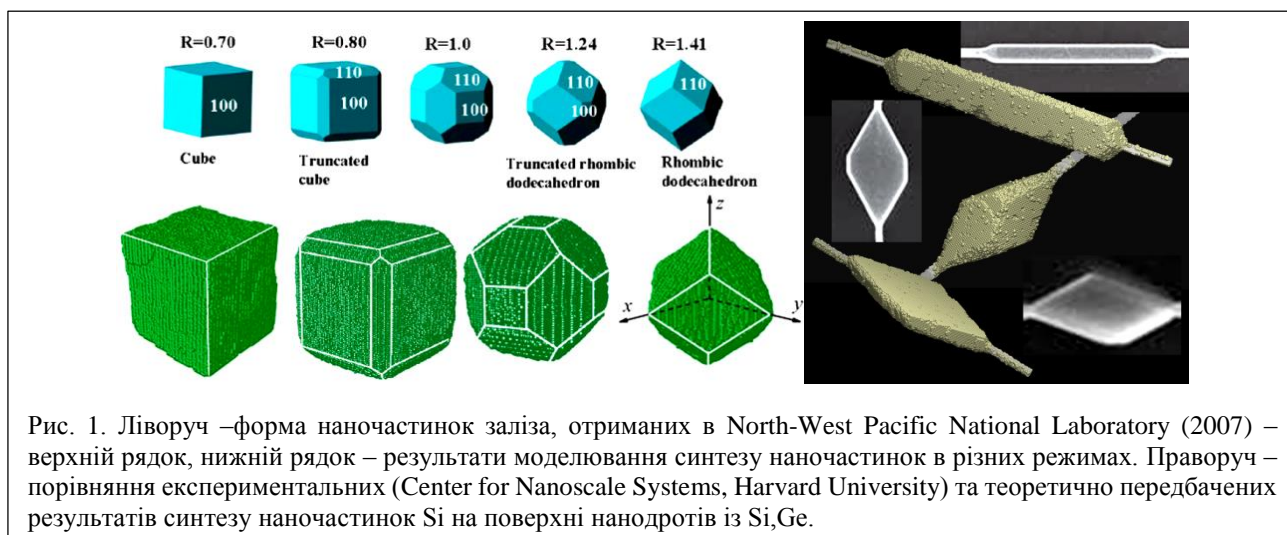
При адсорбції заряджених частинок на поверхні та в тришарових структурах важливим є кулонівська складова взаємодії з поверхнею або поверхнями (дзеркальні сили), яка залежить від екрануючих властивостей середовищ, котрі беруть участь у процесі адсорбції. Так само, взаємодія частинок залежить від співвідношення між діелектричними властивостями середовищ, куди вони занурені. Зокрема, це важливо для аналізу властивостей екситонів у шаруватих структурах. В роботі детально розроблена відповідна теорія. Вона також поширена на незаряджені частинки з постійним дипольним моментом (модель для полярних молекул). Таким чином, кулонівська взаємодія, котра є визначальною в фізиці плазмових джерел та розпилення мішеней іонами, виступає і тут головним чинником.

Українські дослідники, праці яких подаються на Державну премію України, є лідерами в окресленій у даній роботі галузі, знаходяться на вістрі світової науки та додають до неї вагомий внесок.

## 2. ДИНАМІКА НАНОРОЗМІРНИХ СИСТЕМ

Починаючи з 2003 року проведені спільно з Center for Advanced Materials Processing (Potsdam, NY, USA) дослідження динаміки нанорозмірних систем, в яких українська сторона забезпечила теоретичну базу прикладних розробок американських колег щодо методів керування процесами синтезу наноструктур із бажаними фізико-хімічними властивостями.

Окрема увага була зосереджена на керованому формуванні в дифузійному режимі металевих наночастинок (НЧ) із заданою формою. Саме форма НЧ часто визначає їх електричні, оптичні й біологічні властивості. Показано, що навіть при заданій симетрії кристалічної решітки металу геометрія наночастинок може бути напрочуд різною (див. Рис. 1, ліва панель). Керування синтезом базується на врахуванні швидкості процесів дифузії атомів на поверхні НЧ, густини вільних атомів в довколишньому середовищі та важливих ефектів самоузгодження розподілу густини зовнішніх дифузійних потоків вільних атомів на поверхню наночастинок з її поточною формою. Балансуванням на грані зриву в хаотичний



режим синтезу реалізується можливість отримання наночастинок бажаної форми.

Різноманіття фізичних сценаріїв в динаміці наноструктур значно розширюється, якщо формування наночастинок стимулюється наявністю центру конденсації вільних атомів, тобто нанодоту з металу або напівпровідника. Додатковим параметром в цьому випадку є орієнтація вісі нанодоту відносно його внутрішньої кристалічної структури. Результати моделювання методом Монте-Карло такого синтезу ідеально збігаються з експериментальними результатами і відкривають можливості для керованого формування топології нанодотів із Ge, Si, періодично модульованих вздовж їх довжини (щодо форми новоутворень та їх періодичності дивись Рис. 3, права панель), що є важливим для застосування в нанoeлектроніці. Всі знайдені в чисельних експериментах методом Монте-Карло закономірності отримали чітку якісну інтерпретацію.

Також темою нашого довготривалого співробітництва із американськими та іншими закордонними колегами було забезпечення термічної стійкості

нанодротів (НД) або, навпаки, керування параметрами розпаду НД на впорядковані ланцюжки нанокластерів для утворення, наприклад, хвильоводів субмікрохвильового випромінювання бажаної форми.

### 3. КУЛОНІВСЬКА ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДІВ І ДИПОЛІВ У ШАРУВАТИХ СИСТЕМАХ.

Коли розглядаються енергія взаємодії потоку іонів або полярних молекул із поверхнею твердого тіла або енергія адсорбції цих частинок на поверхні, то одним із чільних складників завжди є пряма кулонівська взаємодія заряду або диполя з поверхнею внаслідок її поляризації. Розроблено методи розрахунку такої взаємодії в три- та двох-шарових системах в класичній електростатиці та з урахуванням просторової дисперсії діелектричної проникності підкладки. Отримано низку важливих результатів у різних областях фізики та фізичної хімії конденсованих систем, розв'язані статичні задачі, знайдені динамічні поправки, пов'язані з неадіабатичністю відгуку поверхневих плазмонів, в тому числі, в співпраці з дослідниками Інституту фізики Польської академії наук у Варшаві.

Дзеркальні (поляризаційні сили) впливають не тільки на адсорбцію. Вони, як відомо, роблять суттєвий внесок в матричні елементи тунелювання, котрі визначають величину струму автоелектронної (холодної) емісії із металів. Це давно відомо, але експериментальні залежності тунельного струму  $J$  від електростатичного поля  $F$  суттєво відхиляються від закону Фаулера-Нордгейма (ФН), який розраховується в припущенні, що дзеркальні сили є статичними. Створена теорія збурень дозволила розрахувати залежність  $J(F)$  з урахуванням неадіабатичних поправок, і результат якісно відтворює експериментальні дані.

Розроблені методи дозволили не тільки розрахувати взаємодію заряджених частинок (електронів, іонів) або диполів (полярних молекул) із шаруватим середовищем, в якому вони перебувають, але й розглянути низку ситуацій, коли частинки взаємодіють одна з одною у таких середовищах. Цими проблемами науковці переймаються дуже давно, але наші методи дозволили отримати більш точні, більш зручні, а, інколи, зовсім нові результати для об'єктів, які вже досліджувались раніше.

В літературі при аналізі експериментальних даних часто-густо використовують наближення, яке належить Ритовій і Келдишу, при аналізі кулонівської взаємодії, котра визначає спектр екситонів. Насправді, воно є придатним лише для асимптотично далеких, а тому його використання призводить до значних помилок. Тому ми запропонували новий інтерполяційний вираз для взаємодії, котрий збігається з точним чисельним розв'язком у всьому діапазоні латеральних відстаней між електроном та діркою. Як показано на Рис. 2 для сандвічів, які відповідають напівпровідниковим гетероструктурам, де діелектричні сталі шарів дуже близькі між собою, обчислення за нашою формулою дають результат, що практично не відрізняється від чисельних розрахунків.

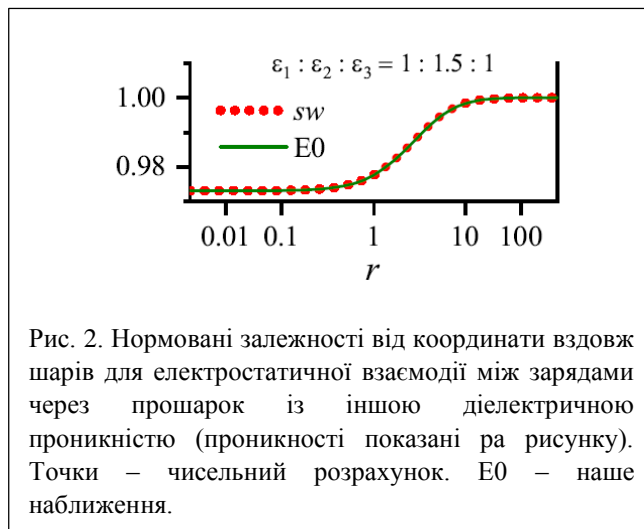


Рис. 2. Нормовані залежності від координати вздовж шарів для електростатичної взаємодії між зарядами через прошарок із іншою діелектричною проникністю (проникності показані на рисунку). Точки – чисельний розрахунок. E0 – наше наближення.

#### 4. МАГНЕТРОННЕ РОЗПИЛЕННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА.

В технології формування низькорозмірних систем використовуються технологічні газорозрядні системи з вторинними емітерами заряджених та нейтральних частинок. До таких систем відносяться магнетронні розпилювачі (МР) конденсованої речовини (металів, напівпровідників та діелектриків). Запропонований та досліджений імпульсний режим роботи МР, який забезпечує стабільність та підвищену густину розрядного струму і високі значення іонної концентрації у плазмі, ніж режим постійного струму. Створені оригінальні імпульсні модулятори для реалізації імпульсного режиму МР. Дослідження виконувались як шляхом кінетичного моделювання (застосовувалися методи Монте-Карло і “частинки у комірці”) так і прямого експерименту. Для визначення швидкості осадження покриття (плівки) на підкладку промодельовані процеси розпилювання емітера з конденсованої вихідної речовини (тобто катода-мішені) й масопереносу розпилених частинок через газ до підкладки. На Рис. 3 показані розраховані функції розподілу потоків

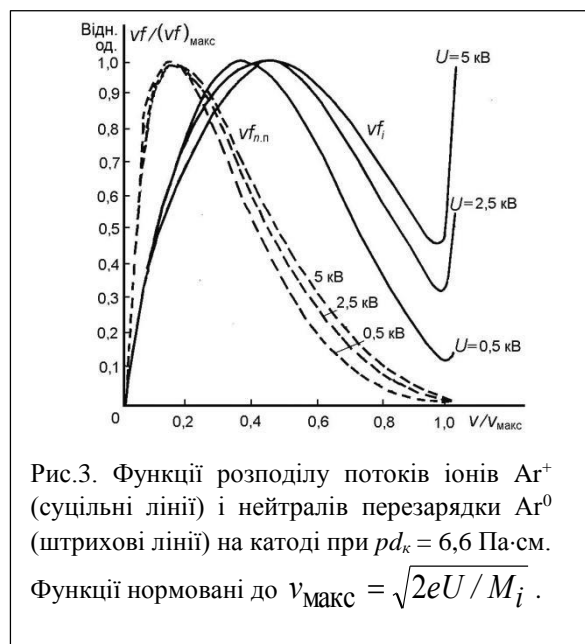


Рис.3. Функції розподілу потоків іонів  $Ar^+$  (суцільні лінії) і нейтралів перезарядки  $Ar^0$  (штрихові лінії) на катоді при  $pd_k = 6,6$  Па·см. Функції нормовані до  $v_{\max} = \sqrt{2eU/M_i}$ .

частинок, які бомбардують катод (індекс  $i$  відноситься до іонів, а  $n.p$  - до нейтралів після перезарядки іонів у прикатодному просторі). У випадку підвищених тисків аргону нейтралі перезарядки  $Ag^0$  розпилюють у декілька разів більше речовини, ніж іони  $Ag^+$ . Розрахована швидкість розпилення, яка враховує тільки вторинну емісію катодних частинок, істотно більша за реальну швидкість осадження на підкладку через розсіювання розпилених частинок в газі (тобто через повернення на катод та осадження на бічні стінки); це було враховано при моделюванні процесу масопереносу розпилених частинок через газ.

Встановлено, що для розрахунку швидкості осадження плівок необхідно використати кінетичний підхід в наближенні “сильного поля” для визначення характеристик потоку частинок, які бомбардують катод-мішень, і враховувати поправку на розсіювання розпилених частинок в газі. Порівняння моделювання методом Монте-Карло емісійних процесів і масопереносу в МР у стаціонарному та імпульсному режимах з різною геометрією поверхні з експериментом підтвердило адекватність запропонованої моделі.

Досліджено МР для осадження мульти-наношарових композитів Ti-B-C-N покриттів з двох дискових нахилених мішеней складу TiN і  $B_4C$ . Формування наношарової структури з аморфними  $\alpha$ -BCN шарами в покритті на основі TiN привело до збільшення нанотвердості в порівнянні з нанотвердістю TiN-покриттів – з 25 до 35 ГПа і твердості по Кнупу – з 35 до 52 ГПа. Основний механізм зміцнення – аморфні шари перешкоджають переміщенню дислокацій.

Досліджено МР для осадження оптичних покриттів з шаруватим і градієнтним зміненням показника заломлення  $n$  при розпиленні мішеней з різних матеріалів (Si і металу – Ti, Ta, Nb) в аргоновому імпульсному (22 кГц) розряді з поданням активованого кисню. Склад градієнтного покриття – суміш оксидів Si і металу; а співвідношення між їх вмістом в покритті і величина  $n$  змінювалися шляхом переміщення підкладки над мішенями.

Запропоновано і реалізовано удосконалення систем для осадження тонких плівок і покриттів із іонно-плазмовою активацією шляхом введення в системи вторинних твердотільних і плазмових емітерів нейтральних і заряджених частинок речовини, яка осаджується, з імпульсним електричним живленням, що дозволяє якісно та оперативно керувати вмістом і мікроструктурою тонких плівок та покриттів і регулювати температурний режим мішеней і підкладок. Імпульсна модуляція також забезпечує стійкість процесів осадження до електричних пробіїв та дугоутворення на підкладках і мішенях, які розпилюються.

## 5. ІННОВАЦІЙНЕ ІОННО-ПЛАЗМОВЕ УСТАТКУВАННЯ ТА ВЗАЄМОДІЯ ПЛАЗМОВИХ ПОТОКІВ З ТВЕРДИМИ МІШЕННЯМИ І ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.

В роботі *вперше в світі* створено й задіяно оригінальне іонно-плазмове устаткування, яке дозволяє досліджувати тонкі нанорозмірні ефекти, пов’язані з структурою поверхні. Реалізовані новітні технології, що ґрунтуються, зокрема,

на використанні геліконного джерела іонно-плазмового потоку та плазмово-дугових прискорювачів (Рис. 4).



Рис. 4. Гібридна іонно-плазмова вакуумно-технологічна установка на базі геліконного іонно-плазмового реактора і плазмово-дугових прискорювачів і схема гібридного геліконно-дугового реактора.

Окрім цього *вперше* виготовлена гібридна вакуумно-технологічна установка прецизійного розмірного травлення для формування топології наноприладів та елементної бази наноелектроніки на базі дворозрядної іонно-плазмової системи, що включає в себе геліконний розряд як джерело хімічно активних радикалів та електродний ВЧ розряд з поперечним магнітним полем як джерело інтенсивного іонного потоку з незалежно регульованими густиною та енергією. Унікальні характеристики геліконного джерела іонно-плазмових потоків дозволили радикально змінювати властивості поверхонь, що оброблюються, на моноатомному масштабі та, при спільній роботі із плазмово-дуговими прискорювачами, надали можливість *вперше* отримати в нерівноважних умовах унікальні плівкові наноструктури.

Цей технологічний інструмент дозволив *вперше* отримати регулярну наноструктуру TiN високої щільності на монокристалічному кремнії (Рис. 5), яка необхідна для задавання початкового рельєфу і щільності пакування при створення функціональних елементів і пристроїв наноелектроніки надвисокої інтеграції.

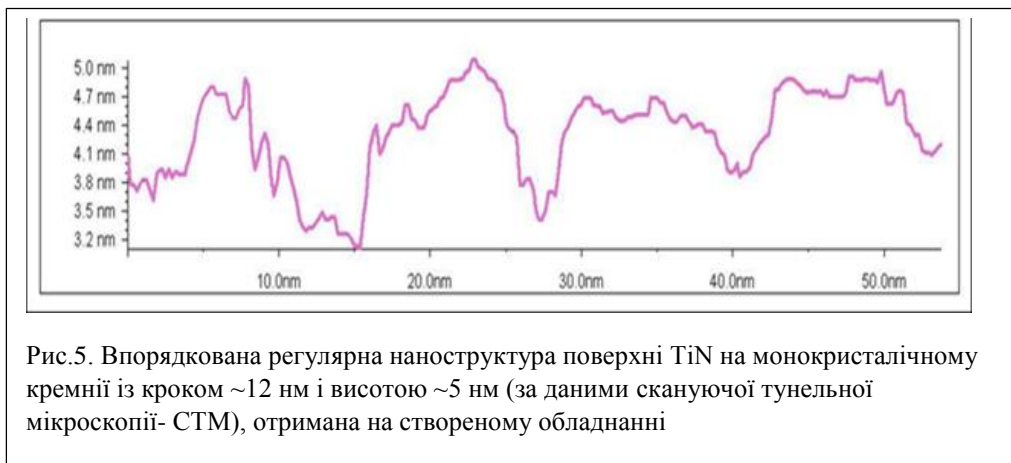


Рис.5. Впорядкована регулярна наноструктура поверхні TiN на монокристалічному кремнії із кроком  $\sim 12$  нм і висотою  $\sim 5$  нм (за даними скануючої тунельної мікроскопії- STM), отримана на створеному обладнанні

*Вперше* створено унікальні наноструктури TiN/Fe і TiN/Fe/C магнітних монодомених нанокластерів, які можуть бути використані для створення

магнітних носіїв із високою щільністю запису гігантських масивів інформації для надпотужних суперкомп'ютерів майбутнього. В наноструктурах TiN/Fe і TiN/Fe/C на монокристалічному кремнії із нанокластерами магнітного Fe *вперше виявлене явище суперпарамагнетизму*, що використовується для магнітного запису інформації. На обладнанні сформована регулярна структура нанокластерів Fe на регулярних «вершинах горбів» TiN на моно-Si із кроком 10-15 нм і висотою ~5 нм. Підтверджена можливість істотно збільшити коефіцієнт анізотропії заліза в наноструктурованому стані для підвищення щільності магнітного запису. Використання вуглецевих наноструктур дозволяє суттєво підвищити чи подолати суперпарамагнітну межу, що істотно підвищить щільність магнітного запису.

Отримані тонкі плівки функціональних матеріалів із характеристиками близькими до монокристалічних на гнучких тонких термолабільних полімерних плівкових підкладках (наприклад, фторопластові і майларові підкладки товщиною 40 – 200 мкм). Тонкі плівки AlN і TiN на цих підкладках демонструють ряд характеристик монокристалічних матеріалів.

Досягнуто ефективне азотування чорних металів для суттєвого покращення їх трибологічних характеристик з вагомими перевагами над існуючими методами азотування.

## 6. НОВИЙ «БАТУТНИЙ» МЕХАНІЗМ РОЗПИЛЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ.

Автори використали потужне джерело іонно-плазмових потоків інертних газів з високим потенціалом іонізації для підвищення ефективності розпилення. Сукупна дія «рясного дощу» низкоенергетичних іонів послаблює зв'язки в приповерхневих шарах твердотільної мішені, викликаючи інтенсивний викид матеріалу. Сутність колективної дії полягає в тому, що під час імпульсу, який діє на поверхню, теплова релаксація не встигає відвести енергію, котра виділяється в малих об'ємах. Механізм взаємодії іонного струму з поверхнею та наступним викидом кластерів речовини було названо *батутним* за аналогією з колективними процесами, котрі відбуваються при землетрусах. Тут кулонівські сили між іонізованими атомами верхніх шарів мішені виконують таку ж роль, як пружні сили у випадку зміщення великих кам'яних брил під час землетрусів. Ефект аномального колективного батутного розпилення плазмово-іонними потоками пов'язаний із ослабленням зв'язку між багатьма атомами в декількох поверхневих шарах, що супроводжується лавино-подібним зменшенням поверхневої енергії когезії. Відхилення бомбардованих шарів в об'єм матеріалу й викликає їхній наступний викид стиснутими додатковим тиском нижніми шарами. Отже, ефективність батутного розпилення набагато вища, ніж у каскадного, саме тому, що в кожному окремому акті викиду бере участь велика кількість атомів у вигляді кластерів.

Модифікація поверхні твердого тіла за рахунок дії іонно-плазмових потоків при батутному розпиленні дозволила керовано створювати поверхневі структури від нанорозмірного до субмікронного масштабів, що забезпечує вплив на властивості матеріалів на різних рівнях шорсткості. В результаті була



отримана можливість створювати високоадгезивні функціональні покриття із збереженням в товстих плівках складу та властивостей багатокomпонентних витратних матеріалів, і суттєво, на порядки, підвищити швидкість процесів формування функціональних покриттів. Це відкриває перспективу промислового широкомасштабного використання технологій модифікації поверхонь та формування покриттів для отримання матеріалів з заданими властивостями.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують передбачену генієм Майкла Фарадея можливість існування п'ятого стану речовини – квазірідини в відомому ланцюгу: тверде тіло, рідина, газ, плазма. Раніше це було доведено для води та деяких інших речовин у режимі термодинамічної рівноваги. Нами існування нової фази було підтверджено для *нерівноважного стану* поверхневих шарів твердого тіла. Експериментальне підтвердження існування стану речовини в вигляді квазірідини (передплавленого стану) незалежно від типу твердого тіла (метал, напівпровідник чи діелектрик) було здійснене завдяки створенню унікального джерела інтенсивних іонно-плазмових потоків газів з високими потенціалами іонізації, що мають густини іонного струму більше десяти мА/см<sup>2</sup> при енергії в десятки – сотні еВ. Це дозволило сконцентрувати потенційну та кінетичну енергію іонно-плазмових потоків в приповерхневих моноатомних шарах та відкрити й дослідити новий колективний батутний механізм розпилення твердих тіл.

Коефіцієнт батутного розпилення суттєво залежить від початкового стану поверхні мішені, що є ще однією з характерних особливостей батутного розпилення. Він практично повністю корелює з величиною густини металу. Аномальне розпилення супроводжується текстуруванням поверхні мішені в нанорозмірному та субмікронному масштабах. Ефект є пороговим та порогова густина та енергія іонів вища для металів з нижчою температурою плавлення.

Підвищення енергії іонів та початкової температури мішені суттєво впливають на характер їхньої структури. Зміна масштабу структури в субмікронному діапазоні викликає зміну кольору, наприклад, мідної мішені від природнього червоного до коричневого та чорного. Перехід від коричневого до чорного кольору може бути отриманий або підвищенням енергії іонів в плазмовому потоці (**b**), (**c**), або попереднім нагріванням мішені до 100°C без зміни енергії (**d**) (Відповідні структури показані на Рис. 6).

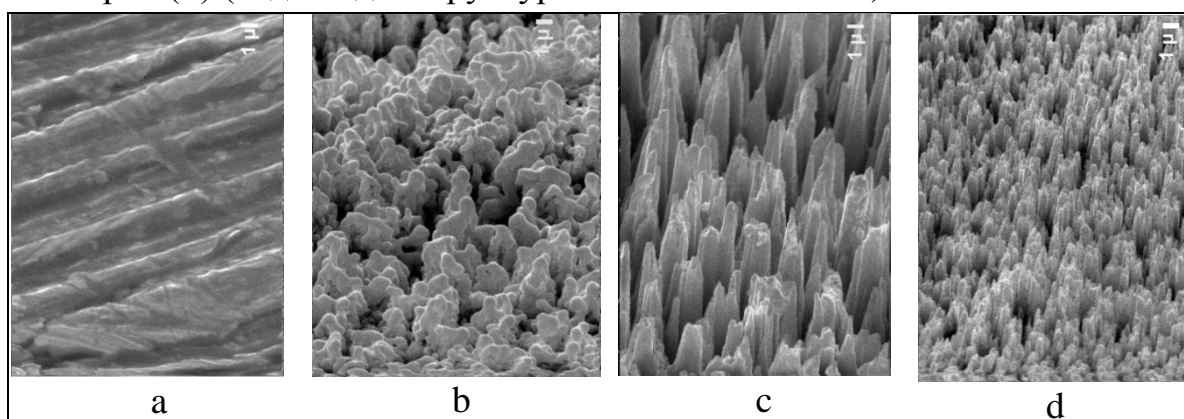


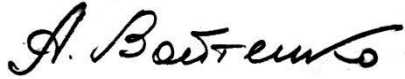






Рис. 6. РЕМ мікрофотографії поверхні мідних мішеней за різних значень енергії іонів та початкової температури (а - червона мідь, b - коричнева мідь, c і d - чорна мідь).

Експериментально встановлено, що технічні переваги використання батутного механізму розпилення твердих тіл пов'язані з текстуруванням поверхні в нанорозмірному масштабі та на нанокластерному розпиленні поверхні мішеней. Як результат отримуємо надвисоку адгезію товстих плівок покриттів без використання проміжних узгоджувачів шарів, підвищену (на 50 – 70 %) швидкість нанесення покриттів в порівнянні з нанесенням на неструктуровані поверхні, відсутність відбиття світла в діапазоні довжин світлових хвиль від ультрафіолетового до інфрачервоного, відсутність консолідації на поверхні підкладки дефектів, які дифундують із об'єму, високу щільність наноструктурованих покриттів, збереження в покритті складу багатокомпонентного матеріалу мішені. За батутною технологією лежить майбутнє в створенні функціональних покриттів.

Отримані наукові результати вже сьогодні забезпечують суттєві технологічні прориви в таких сучасних напрямках науково-технічного прогресу як фотовольтаїка та високо-ємнісні літій-іонні джерела в альтернативній безвуглецевій енергетиці

## 7. РЕЗЮМЕ.

Представлена до Комітету з Державних премій України робота є дослідженням, котре об'єднує зусилля в царинах теоретичної фізики, фізики плазми та фізики конденсованих середовищ. Завдяки науковим працям, які входять до узагальнюючої роботи, вдалося суттєво просунути вперед наше розуміння як елементарних процесів, котрі відбуваються на межі розподілу середовищ, так і колективних процесів, пов'язаних із синергетичною дією багатьох частинок та різноманітних чинників, та довести це розуміння до суто практичних результатів інженерного гатунку. Зокрема, дослідження атомної дифузії та динаміки утворення малих частинок значною мірою просунули вперед наше розуміння цих процесів, що конче важливо для експериментальної фізики й хімії, котрі досліджують кристалізаційні процеси чи-то в маленьких, чи-то в великих промислових масштабах. Водночас, теоретичні студії дзеркальних сил та кулонівської взаємодії зарядів в шаруватих структурах створили підвалини для правильної інтерпретації взаємодії низькоенергетичних іонно-плазмових потоків високої густини із поверхнями твердих тіл. Результатом стало відкриття нового колективного батутного механізму розпилення твердих тіл, цілеспрямоване застосування якого забезпечило нові технологічні прориви в галузі фотовольтаїки, ЛІБ із високими питомими параметрами та при формуванні наноструктурованих функціональних покриттів зі спеціальними характеристиками. Головним досягненням сукупності цих праць є подальші перспективи, які повстали впродовж виконання досліджень. А саме, на підставі проведеної роботи будуть створені нові наукові концепції, відбудеться впровадження наукових результатів у промисловість та залучення студентів одного з найбільших ВНЗ країни до сучасної науки з її поєднанням високої теорії та плідної практики.

ПІБ	Підпис
Войтенко Олександр Іванович	
Габович Олександр Маркович	
Горшков В'ячеслав Миколайович	
Короташ Ігор Васильович	
Кузьмичев Анатолій Іванович	
Руденко Едуард Михайлович	
Семенюк Валерій Федорович	
Семенюк Надія Іванівна	