

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ім. Г. В. КУРДІУМОВА

СЕМЕНЮК НАДІЯ ІВАНІВНА



УДК 538.9; 539.87; 533.9; 537.5

**УПРАВЛІННЯ МОРФОЛОГІЄЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ТІЛ ПІД ДІЄЮ ЩІЛЬНИХ
НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОТОКІВ**

Спеціальність 01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі теорії металічного стану Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, у відділі фізики кристалів Інституту фізики НАН України, в Науково-інвестиційному підприємстві ТОВ «Гресем Іновейшн», у відділі теорії плазми Інституту ядерних досліджень Академії наук УРСР.

Науковий керівник: Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Габович Олександр Маркович,

Інститут фізики Національної академії наук України,
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук, старший дослідник

Владимирський Ігор Анатолійович,

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
директор

Доктор фізико-математичних наук, старший дослідник

Шпортько Костянтин Валентинович,

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова
Національної академії наук України,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться 16 червня 2026 р. о 16:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.168.02 Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36.

З дисертаційними матеріалами можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36). Електронні версії матеріалів дисертації розміщено на офіційному вебсайті Інституту: https://www.imp.kiev.ua/?lang=ukr&a=dissert_sovet&str=dissert_years2.

Автореферат розіслано 09 травня 2026 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.168.02

д.ф.-м.н, с.н.с.

Тарас РАДЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досягнення сучасної науки та техніки базуються на нових матеріалах, що функціонують в приладах, устаткуванні та побутових речах. Отримання нових матеріалів та їх функціонування значною мірою залежать від взаємодії зовнішнього електромагнітного випромінювання, потоків електронів або іонів із поверхнею металічних, напівпровідникових, діелектричних, полімерних матеріалів. Тому вивчення особливостей та способів модифікації поверхні є важливою задачею для дослідників. Одним із найбільш практичних методів отримання бажаних фізичних властивостей поверхні є іонно-плазмова інженерія, яка має високу енергетичну ефективність та толерантна до довкілля. Цей метод надає можливість керувати процесами взаємодії плазмових потоків з поверхнею в широкому енергетичному діапазоні. Актуальною є задача дослідження процесів створення щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків, які взаємодіють з поверхнею твердого тіла на нано-рівні без збурення його об'єму, що мінімізує енерговитрати.

Вивчення елементарних процесів взаємодії іонно-плазмових потоків з конденсованими фазами речовини на нанорозмірному рівні є актуальним як для фундаментальної науки, так і для технологічних застосувань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася:

- завершальна робота над дисертацією – у відділі теорії металічного стану та відділі надпровідникової електроніки Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України в рамках відомчої тематики «Самоорганізація структури, електронна будова та фізичні властивості новітніх металовмісних матеріалів» (державний реєстраційний номер 0122U002396, 2022-2026);
- у відділі фізики кристалів Інституту фізики НАН України – проєкт ІФ-2023/2 за Цільовою науково-технічною програмою досліджень НАН України на 2020-2024 роки та проєкти РН/29-2023 та РН//44-2024, які фінансувалися за кошти спеціального фонду, отриманих за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020»;
- у Науково-інвестиційному підприємстві ТОВ «Гресем Іновейшн» в рамках інвестиційних програм підприємства: «Кремній-композитні аноди літій-іонних батарей з високою питомою ємністю», 2013-2017 роки; «Іонно-плазмова технологія чорного кремнію для фотовольтаїчних елементів», 2017-2019 роки. Результати увійшли в роботу «Фізико-технічні засади створення керованих нано- і мікроструктур на поверхні твердих тіл», за яку в 2021 році здобувачці в складі колективу авторів була присуджена Національна премія України імені Бориса Патона.
- у відділі теорії плазми Інституту ядерних досліджень НАН України в якості аспірантки за темою «Нелінійні хвильові взаємодії в плазмі».

Мета і завдання досліджень: Мета роботи – встановити ефективні методи створення ієрархічних субмікронних структур з нанорозмірним рельєфом для отримання високих експлуатаційних властивостей поверхонь твердого тіла для застосування в екологічно дружніх технологіях створення функціонально стабільних покриттів на поверхні твердих тіл.

Для досягнення визначеної мети вирішувались наступні задачі:

- дослідити процеси прискорення іонно-плазмових потоків в приелектродних шарах неоднорідної плазми;
- вивчити механізми створення на поверхні твердого тіла ієрархічних двомасштабних

структур з нанорозмірною складовою;

- визначити вплив мікроскопічних структур на фізичні характеристики модифікованої поверхні твердого тіла.

Об'єкт дослідження: механізми введення енергії зовнішнього ВЧ поля для створення джерела щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків та процеси модифікації поверхні твердого тіла під дією зазначених потоків.

Предмет дослідження: механізми прискорення іонно-плазмових потоків в приелектродних шарах неоднорідної плазми, фізичні процеси модифікації поверхні твердого тіла із створенням ієрархічних поверхневих структур, зв'язок між мікроскопічними характеристиками та фізичними характеристиками модифікованих поверхонь твердого тіла.

Методи наукового дослідження: вивчення і аналіз наукової та технічної літератури за тематикою досліджень; аналітичні розрахунки та чисельне моделювання; аналіз властивостей модифікованої поверхні методами сканувальної електронної мікроскопії з додатковим енергодисперсійним аналізом, атомно-силової мікроскопії, мас-спектрометрії вторинних іонів, методами склерометрії та безконтактної оптичної профілометрії.

Наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист:

1. Вперше досліджено генерацію гармонік власних плазмових хвиль на неоднорідностях плазми для збагачення енергетичного спектру іонів в плазмовому потоці та вплив на перенос енергії в плазмовому середовищі на межі плазми з обмежуючими поверхнями. Визначено просторові зони поглинання енергії, коефіцієнт трансформації хвиль в неоднорідній плазмі та вивчені механізми передачі енергії зовнішнього ВЧ поля в плазму застосовані для реалізації плазмово-хвильового механізму прискорення іонно-плазмового потоку і передачі енергії із зони генерації до поверхні твердого тіла.
2. Вперше досліджено динаміку приелектродних шарів ВЧ розряду в схрещених електричному та магнітних полях та визначена роль хвильових ефектів та стаціонарних полів в енергетичних характеристиках потоків заряджених частинок в плазмових утвореннях. Підтверджено здатність приелектродного шару прискорювати іони до енергій, які значно перевищують теплову енергію іонів плазми. Показана можливість зміни полярності стаціонарного потенціалу ВЧ електроду несиметричного розряду. Виявлена спадаюча залежність коефіцієнта дифузії електронів і початкової швидкості іонів від напруженості магнітного поля на межі приелектродного шару, що приводить до результуючого зменшення енергії іонів із збільшенням магнітного поля.
3. Вперше встановлена активна роль переосадження іонізованих в приповерхневому шарі розпиленних з поверхні частинок в пріоритетному нарощуванні поверхневих структур внаслідок їх концентрації в зонах високих величин неоднорідного електричного поля.
4. Вперше спостережений та досліджений новий режим розпилення поверхні твердого тіла під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових, який отримав назву «батутний ефект», який забезпечує створення функціонально стабільних покриттів з високими фізичними характеристиками. В дисертації знайдений ефект батутного розпилення інтерпретується як прояв переходу поверхневих шарів в квазірідинний стан та зміни електронних станів на поверхневих структурних утвореннях під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків на поверхню твердого тіла без збурення об'єму матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів: Застосування батутного ефекту надало можливість модифікувати поверхню твердого тіла з утворенням нанорозмірних структур з субмікронним рельєфом та сформувати на ній покриття з високою адгезією, щільністю та

високими трибологічними характеристиками. Формування покриттів з використанням батутного ефекту, зважаючи на високу ефективність, енергетичну ощадливість та екологічну чистоту технологічних процесів, з успіхом можна застосовувати в технології «чорного кремнію» для фотовольтаїчних елементів, кремній композитних анодів для літій іонних акумуляторів з високими питомими характеристиками, створенні функціонально стабільних покриттів на внутрішній поверхні просторово-обмежених конфігурацій з великим аспектним відношенням довжини до діаметру тощо. Батутний ефект застосовувався для формування покриттів з підвищеними фізичними властивостями при виконанні спільних інноваційних проєктів Інституту фізики НАН України з Інститутом фізики напівпровідників імені В.Є.Лашкарьова НАН України та Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», що фінансувалися Міністерством освіти і науки України та Національною академією наук України. Отримані знання сприяють створенню новітніх високоефективних технологій іонно-плазмової інженерії поверхні для отримання функціонально стабільних покриттів з високими фізичними та експлуатаційними характеристиками. Всі отримані результати опубліковано у фахових міжнародних та вітчизняних виданнях та доповідались на численних міжнародних конференціях.

Особистий внесок здобувача. Здобувачка виконувала аналітичні дослідження генерації гармонік в неоднорідній плазмі, чисельне моделювання процесів в приелектродних шарах неоднорідної плазми, займалася підбором літератури за темами публікацій, готувала тези та робила доповіді на конференціях, приймала активну участь в аналізі, систематизації та узагальненні всіх отриманих результатів та написанні публікацій.

Дисертантка висловлює щире подяку за допомогу при проведенні спільних досліджень науковому керівнику Габовичу О.М., Давидовій Т.А. за керівництво аспірантурою, Гуріну А.А. за плідну співпрацю та співробітникам відділу теорії металічного стану та відділу напівпровідникової електроніки Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, відділу фізики кристалів Інституту фізики НАН України, Центру колективного користування приладами «Діагностика напівпровідникових матеріалів, структур та приладних систем» та відділу іонно-променевої інженерії і структурного аналізу Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, лабораторії наноструктурних кристалофізичних досліджень та спектрального аналізу Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень були представлені та обговорювались на 8 вітчизняних та міжнародних конференціях: IV Всесоюзная конференция "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Ташкент, 1985; Республиканская научно-техническая конференция «Экспериментальные исследования и математические модели физико-химических процессов в сплошных средах», Киев, 29 мая – 01 июня, 1985; IV Всесоюзное совещание «Математическое моделирование физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах», Туапсе, 14 – 18 мая 1990 года; IX International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC 2015), Shizuoka GRANSHP, Japan, 24th – 28th May, 2015; Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, Київ, Україна, 11 – 12 грудня 2019 року; VI Наукова конференція «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» (НАНСИС 2019), Київ, Україна, 4 – 6 грудня 2019 року; International Conference of Young Scientists and Post-Graduates of Institute of Electron Physics, 21st – 24th May, 2019, NAS of Ukraine, Uzhhorod; VI Міжнародна

науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка», Кременчуцький національний університет, Кременчук, Україна, 14 – 16 травня 2020 року.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 статей, в тому числі 4 – в наукових фахових виданнях України, 6 – в наукових фахових виданнях інших держав; 6 статей проіндексовані у Scopus/Web of Science, в тому числі: 3 – Q1, 1 – Q2, 2 – Q3; 8 тез у збірниках наукових конференцій; 6 додаткових публікацій, в тому числі, 3 - науково-технічні звіти та 3 – патенти України на корисні моделі.

Структура та об'єм роботи. Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, що містить 243 посилання. Загальний об'єм дисертаційної роботи 155 сторінок, робота містить 44 рисунка та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, встановлено мету та основні задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, описано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, представлено узагальнену структуру і обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ містить огляд літературних джерел, що стосуються сучасного стану питання. Мікро- та нанорозмірні структури на твердих поверхнях можна створювати за допомогою сконцентрованих потоків, найчастіше для цього використовувались іонні пучки або лазерне опромінення та опромінювались зразки з кристалічних або аморфних напівпровідників та металів. Модифіковані поверхні використовуються у фотовольтаїці, електроніці, оптиці, трибології, виробництві самоочисних (наприклад, супер-гідрофобних) матеріалів, виробів, що мають працювати в екстремальних умовах, та в біомедицині. Застосовані методи здійснювали вплив як на поверхню, так і на приповерхневий шар об'ємного матеріалу, що визначало надлишкові затрати енергії в порівнянні з необхідними витратами на модифікацію безпосередньо поверхні, не зачіпаючи об'єму твердого тіла.

Тематичний фокус зусиль щодо зміни властивостей поверхні твердого тіла відкриває перед дослідниками багатогранний світ виконаних досліджень та отриманих знань, що стосуються як вибору інструментів енергетичного впливу на поверхню, так і процесів в твердому тілі під дією зовнішніх сил. Серед такого різноманіття знань нас зацікавили саме процеси впливу щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків на тверде тіло, коли дисипація введеної енергії відбувається в поверхневому шарі матеріалу, не впливаючи на його об'єм.

Разом з тим, цінним в цих технологіях є їх екологічна дружність до зовнішнього середовища та енергетичну ощадливість технологічних процесів.

Другий розділ включає результати дослідження механізмів передачі енергії від зовнішнього джерела в плазму з метою створення щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків, які забезпечують модифікацію поверхні твердого тіла без впливу на об'єм. Це стосується як прискорення іонів в приелектродному шарі ВЧ розряду в магнітному полі [3,4], так і плазово-хвильового механізму передачі енергії в плазмовий потік з розширенням діапазону енергій внаслідок розширення частотного спектру власних плазмових хвиль [1, 2].

Дослідження шарів плазми, що межують з поверхнями, становлять інтерес для розуміння специфічних властивостей розрядів, які цілком визначаються приелектродними шарами, і з точки зору визначення ефективних граничних умов для рівнянь переносу, що описують об'ємні розподіли основних параметрів плазми.

Досліджено картину приелектродного шару ВЧ розряду в магнітному полі та вплив магнітного поля як фактору, що регулює енергію іонного бомбардування [3]. Виконано числові розрахунки параметрів плоского приелектродного шару в розв'язках гідродинамічних рівнянь переносу електронів та іонів в схрещених $E \times H$ полях в разі змінного струму поблизу електроду ВЧ розряду, що не емітує. В обраній моделі рішення визначалось основним зовнішнім параметром – амплітудою струму в ланцюгу ВЧ генератора.

Числове моделювання процесів утворення потоку прискорених іонів в приелектродних шарах виконано для умов, що відповідали експерименту [1]:

$$v_i \ll \omega_{Hi} \ll v_e \sim \omega \ll \omega_{He}, \quad v_{Te} \ll v_{Di}, \quad (1)$$

де ω – частота ВЧ поля, ω_{Hi} , ω_{He} – циклотронні частоти, v_i , v_e – частоти зіткнень іонів та електронів, v_T , v_D – теплова та дрейфова швидкості в приелектродному шарі.

В розрахунках була застосована аналітична гідродинамічна модель, яка у відповідності до параметрів експерименту описувала конвекцію моноенергетичного потоку незамагнічених іонів без зіткнень, а також поляризаційний дрейф, поперечну провідність та дифузію замагнічених електронів, де $E(x, t)$ – електричне поле вздовж x , електрод $x = 0$, плазма $x > 0$:

$$\begin{aligned} (\partial/\partial t)n_i + (\partial/\partial x)(v_i n_i) &= 0, \quad (\partial/\partial t)v_i + v_i(\partial/\partial x)(v_i) = (e/m_i)E(x, t), \\ (\partial/\partial t)n_e + (\partial/\partial x)(v_e n_e) &= 0, \quad (\partial/\partial x) E(x, t) = 4\pi e(n_i - n_e). \end{aligned} \quad (2)$$

Граничні умови та рішення виконано в самоузгодженому обчисленні як розподілу полів та часток в шарі, так і визначення основних параметрів: ширини та коефіцієнту дифузії (x_0 та $D = v_e T_e / (m_e \nu \omega_{He}^2)$). Початкові розподіли густини електронів та іонів приймалися довільними, що відповідають умові квазінейтральності плазми у всьому об'ємі та умові компенсації постійних складових електронного та іонного струму

$$n_0 v_0 = -D (\partial/\partial x) n_0(x_0, t). \quad (3)$$

Обрані граничні умови на електроді не враховували вторинну електронну емісію, що справедливо для матеріалів з великою роботою виходу та енергією іонів ~ 100 еВ, коли емітовані електрони вносять незначний внесок в густину на електроді $\sim 0,01 n_i$. Задача розв'язувалась із залученням метода корекції потоків для числового інтегрування рівнянь неперервності. Використані граничні умови для електронів з великою фізичною дифузією приводить практично до тієї ж картини шару, що і звична умова поглинання $n_e(0, t) = 0$.

Типова картина середнього за період розподілу густини електронів та іонів, що виникає після релаксації початкового розподілу в приелектродному шарі, показана на Рис. 1, тиск плазмоутворюючого газу Ag $p = 10^{-3}$ Торр, магнітне поле $H = 300$ Е, $n_0 = 10^{12}$ см⁻³, енергія іонів $W_{i0} = 1$ еВ, $v_e = 10^7$ сек⁻¹, $\omega_0 = 8 \times 10^8$ сек⁻¹, $x_0 = 0,5$ см. На Рис. 1 показано існування відриву електронів від іонів біля електроду, що приводить до виникнення середнього позитивного потенціалу в плазмі, залежності якого для різних значень магнітного поля H наведені на Рис.2. Результати підтверджують здатність приелектродного шару прискорювати іони до енергій, що значно перевищують температуру плазми, а саме, ту енергію, що можуть отримати іони в центральній області плазми при її позитивному потенціалі W_{i0} .

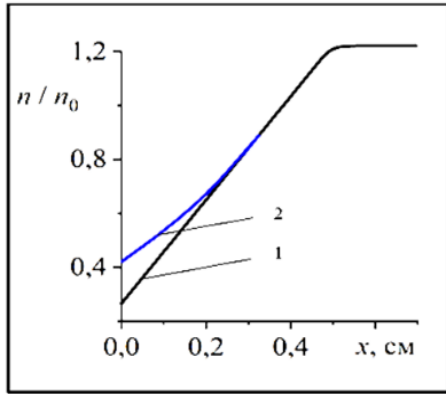


Рисунок 1 – Розподіл в приелектродному шарі середньої густини (1) електронів та (2) іонів

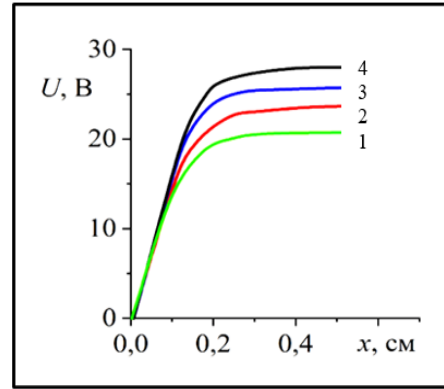


Рисунок 2 – Розподіл середньої за часом напруги в приелектродному шарі для різних значень магнітного поля H : (1) – 200 E, (2) – 300 E, (3) – 400 E, (4) – 500 E

Це прискорення іонів пояснюється їх амбіполярним захопленням електронами, для яких перенос поблизу поглинаючого електрода полегшено, зважаючи на високий рівень дифузії, узгодженої з конвективним потоком іонів, що залишають розряд (Рис. 3, 4).

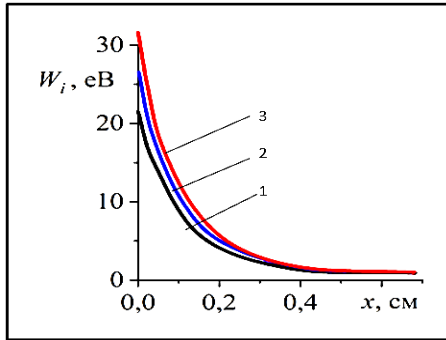


Рисунок 3 – Розподіл середньої за часом енергії іонів в приелектродному шарі для різних значень магнітного поля H : (1) – 200 E, (2) – 400 E, (3) – 500 E

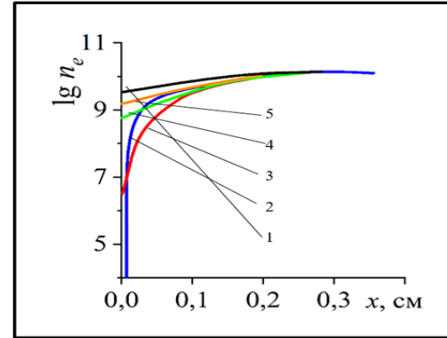


Рисунок 4 – Динаміка густини електронів в приелектродному шарі в межах 20-го періоду ВЧ поля для $x_0 = 0,2$ см, $H = 300$ E та різного часу в межах часток 20-го періоду: (1) - 20, (2) - (20 + 0,2), (3) - (20 + 0,4), (4) - (20 + 0,6) та (5) - (20 + 0,8)

Розрахунки також показали існування ЕРС несиметричного розряду (Рис. 5). За наявності двох електродів різних площ та заданій амплітуді струму розряду зустрічні приелектродні потенціали плазми не компенсуються та визначають кінцеву різницю потенціалів на електродах, тобто існує можливість зміни полярності стаціонарного потенціалу ВЧ електрода.

Числове рішення рівнянь (4) також виконувалось неявним методом корекції потоків за умови, коли струм розряду приймався в якості одного з основних параметрів приелектродного шару, який вважався сталим та рівним сумі струмів провідності та зміщення. В точці x_0 , на межі шару з квазінейтральною плазмою густиною n_0 електрична складова та змінна складова швидкості іонів визначались через амплітуду розрядного струму I за законом лінійного відгуку, постійне електричне поле приймалось рівним нулю, на межі приймалась умова компенсації постійних компонент струмів частинок:

$$\begin{aligned} (\partial/\partial t)n_{e,i} + (\partial/\partial x)(j_{e,i}) &= 0, j_e = -\alpha_e n_e (\partial/\partial t + v_e) E(x, t) - D \partial/\partial x(n_e), \quad \alpha_e = e / (m_e \omega_{He}^2), \\ j_i &= -n_i v_i, (\partial/\partial t)v_i + v_i(\partial/\partial x)(v_i) = (e/m_i) E(x, t), (\partial/\partial x) E(x, t) = 4\pi e(n_i - n_e). \end{aligned} \quad (4)$$

Система рівнянь (4) описує конvekцію моноенергетичного потоку незамагнічених іонів, а також поляризаційний дрейф, поперечну провідність та дифузію замагнічених електронів у наближенні нехтування іонізації поблизу електродів, коли усереднені за часом потоки часток зберігаються по ширині приелектродного шару [4].

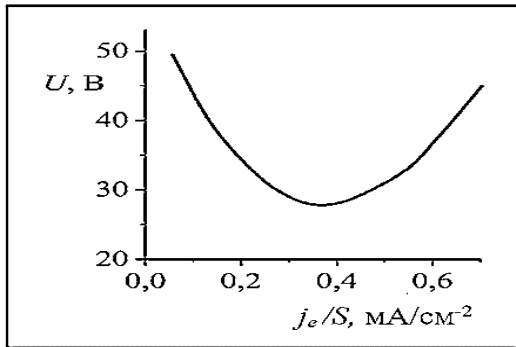


Рисунок 5 – Залежність середньої напруги U від амплітуди густини струму розряду j_e/S , коли $n_0 = 1,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$

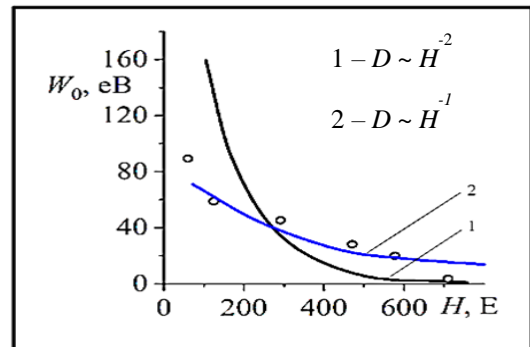


Рисунок 6 – Залежність середньої енергії іонів W_0 , що падають на електрод, від магнітного поля H . Крапки – експериментальні значення, отримані методом графічного диференціювання кривих затримки струму колектора аналізатора

Розрахунки виконувались у відсутності постійної складової струму розряду за умови компенсації постійних компонент струмів частинок $n_0 v_0 = -D (\partial/\partial x) n_e / x = x_0$, де v_0 – початкова швидкість конvekції іонів плазми. Приелектродні густини іонів та електронів обчислювались прогнозуванням першого порядку. Розв'язок показав, що відносне збіднення шару електронами є результатом спільної дії дрейфу та дифузії електронів. Детальні розрахунки динамічної картини шару показали, що в певні долі ВЧ періоду поляризаційний дрейф електронів приводить до відриву електронів від електроду. Одночасно в приелектродній області формується градієнт електронної густини, що забезпечує дифузійний приплив електронів до електроду у відповідності з умовою безперервності середнього потоку часток.

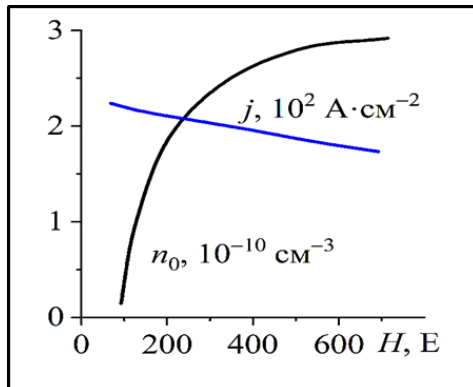


Рисунок 7 – Залежність густини плазми n_0 та густини іонного струму j від магнітного поля H для $p = 2 \times 10^{-3}$ Торр та коли $W_0 = 1$ еВ для $H = 300$ Е

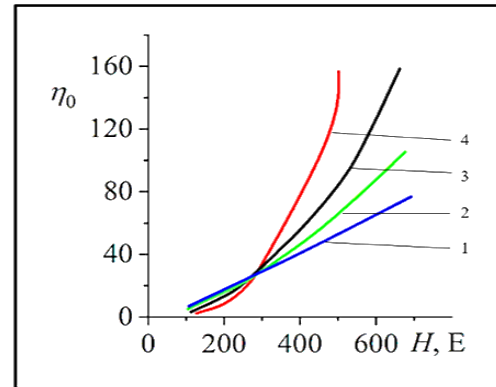


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта підсилення η_0 від магнітного поля: (1) та (3) – числові розрахунки за рівнянням (4); (2) та (4) за формулою (5)

Зважаючи на відсутність експериментального критерію межі області квазінейтральності, була використана залежність від магнітного поля $n_0(H)$, подібна до отриманої з вимірювань в центрі розрядного проміжку. Найбільш суттєвим виявився ефект спадаючої залежності коефіцієнта дифузії електронів (і початкової швидкості іонів з причини відсутності постійного струму) від магнітного поля H в приелектродному шарі (Рис. 6).

На Рис.6 наведені результати розрахунку енергії падаючих на електрод іонів для

граничної умови $n_e = 0$, $n_i = 0$, якщо $v_i > 0$ та степеневих законів дифузії іонів, що падають на електрод $D \sim H^{-2}$ – крива (1) та $D \sim H^{-1}$ – крива (2), що зазвичай обговорюються теоретично. Калібрувальною умовно була обрана точка $H = 300 E$, де розрахункове значення енергії іонів біля електрода узгоджується з експериментальним при початковій швидкості іонів $v_0 = (2W_0 / m_i)^{1/2}$, що відповідає $W_0 = 1$ еВ. На Рис. 7 наведені експериментальні значення величин та їх залежність від магнітного поля, які використані в розрахунках. Показано, що обидва закони $\sim H^{-2}$ та $\sim H^{-1}$ якісно відповідають експерименту, визначаючи характер залежності середньої енергії іонів, що падають на електрод, від магнітного поля, експериментально отримані значення середніх енергій іонів вкладаються в діапазон, обмежений кривими 1 та 2. Найбільш суттєвим є вирішальна роль шару в формуванні прискореного потоку іонів в розглянутому діапазоні напруженості магнітного поля. Коефіцієнт прискорення іонів $\eta_0 = W / W_0$ для високих значень напруженості магнітного поля досягає двох порядків, хоча абсолютні значення енергії іонів W , W_0 зменшуються із зростанням H . Для якісного пояснення використане усереднене рівняння Пуассона в змінних η_0 та ξ , де $\xi = \xi_0(1 - x/x_0)$, у випадку, коли густина іонів задана в наближенні стаціонарного потоку $(\sqrt{\eta / \xi}) \eta \xi = const$, яке при $\eta \gg 1$ має рішення $\eta \sim \xi^2$, звідки

$$\eta_0 \equiv \eta(\xi_0) = (e \xi_0 U / W_0)^{1/2}, U = 2\pi e n_0 x_0^2 \quad (5)$$

Незначна відмінність значень η_0 , отриманих з точного рівняння та спрощеної оцінки, свідчить про відносно слабку залежність параметрів приелектродного шару від магнітного поля в розглянутому діапазоні значень на Рис. 8.

Дослідження підтвердило визначальну роль приелектродного шару в формуванні прискорених іонних потоків, що падають на електрод ВЧ розряду перпендикулярно магнітному полю [3, 4]. Показана здатність приелектродного шару прискорювати іони до енергій, що значно перевищують температуру плазми, а саме, ту енергію, що можуть отримати іони в центральній області плазми при її позитивному потенціалі. Визначено, що магнітне поле є фактором, що регулює енергію іонного бомбардування поверхні матеріалу. Знайдено шляхи цілеспрямованого керування енергетичними характеристиками іонно-плазмових потоків в напрямку вздовж магнітного поля до поверхні, що обробляється, що дозволило знаходити оптимальні об'ємні параметри плазми та механізми зменшення втрат плазми поперек магнітного поля.

Взаємодія електромагнітного поля з неоднорідною плазмою спричиняє низку нелінійних ефектів, серед яких практичне значення мають трансформація електромагнітних хвиль в потенційні, генерація гармонік високочастотного (ВЧ) поля, генерація потоків прискорених електронів та процеси злиття електромагнітних хвиль, які відсутні в однорідній плазмі. За наявності області сильно неоднорідної плазми, коли довжина хвилі λ набагато більше характерного розміру неоднорідності a , залежність поля хвилі від координати стає суттєво негармонічною. Якщо в області неоднорідності існують точки плазмового резонансу, де зовнішня електромагнітна хвиля викликає резонансні коливання вільних електронів у наноматеріалах, то у цьому стані система поглинає енергію, і точка резонансу – це частота, при якій цей ефект проявляється найбільше, коли частота зовнішнього електромагнітного поля збігається з резонансною частотою коливань електронів у наночастинці, а ефект генерації гармонік зростає, оскільки збільшується амплітуда хвиль [1, 2].

Досліджена генерація другої гармоніки р-поляризованої хвилі з області сильно неоднорідної плазми $0 < x < a$, де мають місце точки плазмового резонансу на частотах першої

та другої гармоніки для різних профілів густини плазми. Отримано коефіцієнт трансформації енергії в другу гармоніку за умови, коли густина плазми n зростає монотонно або змінюється немонотонно (Рис. 9) та показано, що внесок околу резонансної точки на нелінійний ефект генерації другої гармоніки є суттєвим в порівнянні з внеском всієї зони неоднорідності [1].

На Рис. 9 показано: (1) - монотонний профіль густини плазми, який всередині інтервалу від x_1 до x_2 , містить точки плазмового резонансу; стрілками показані напрямки розповсюдження падаючої хвилі, хвилі, що відбивається та хвилі, що пройшла на основній частоті ω та хвилі другої гармоніки, що випромінюється із зони неоднорідності плазми; (2) – немонотонний профіль густини плазми, який містить спадаючу ділянку профілю (прогин) між x_1 та x_3 , де густина спадає значно повільніше, ніж на зростаючій ділянці.

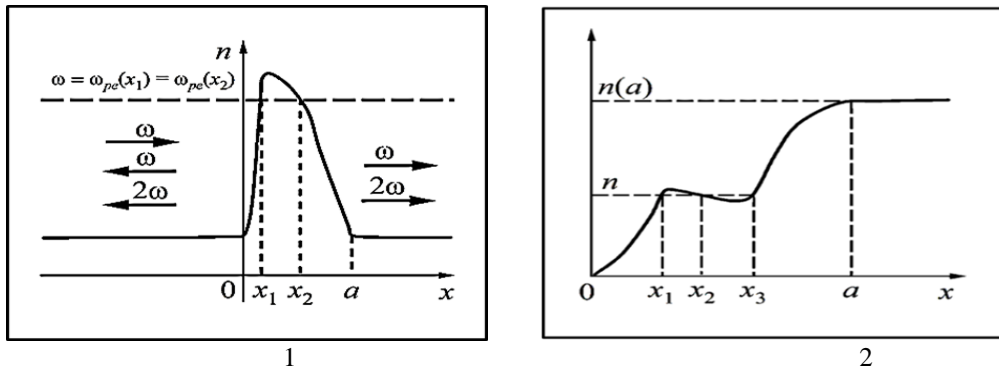


Рисунок 9 – Профілі густини плазми n в околі зони сильної неоднорідності a .

Дослідження виконувалось в наближенні холодної плазми $(r_{de}/a)^{2/3} \ll v_{eff}/\omega \ll 1$, де r_{de} – дебаївський радіус електрона, v_{eff} – ефективна частота зіткнень та показано, що внесок околу резонансної точки на нелінійний ефект генерації другої гармоніки є суттєвим в порівнянні з внеском всієї зони неоднорідності [1].

Якщо за зоною сильної неоднорідності $x > a$ $\varepsilon_1(x) < 0$ але $\varepsilon_2(x) > \alpha^2$, де ε_1 та ε_2 – діелектричні проникності для першої та другої гармонік відповідно:

$$\varepsilon_1(x) = 1 - [(\omega^2(x)/\omega_e^2)(1 - i(v_{eff}/\omega))], \quad \varepsilon_2(x) = [(\varepsilon_1(x) + 3)/4], \quad \varepsilon(x_0) = \varepsilon_1(0), \quad \alpha^2 = \sin^2 \theta, \quad (6)$$

де θ – кут падіння хвилі на плазму, та в зоні $0 < x < a$ виконуються умови плазмового резонансу на частотах падаючої хвилі і її другої гармоніки $\varepsilon_2(x) < 0$ для $x > a$, тоді для обох цих випадків коефіцієнт трансформації відмінний від нуля в наближенні $|\omega a/c| \rightarrow 0$ та за порядком величини визначається відношенням

$$\eta \sim (eH_0 / m\omega c)^2, \quad (7)$$

де H_0 – напруженість магнітного поля падаючої електромагнітної хвилі частотою ω .

Якщо профіль плазми в зоні неоднорідності симетричний, то внески точок плазмового резонансу компенсуються і зростання випромінювання другої гармоніки очікувати не варто. Але, якщо профіль неоднорідності несиметричний та виконуються умови

$$|(\partial/\partial x) \varepsilon_1(x)|_{x_2}^{-1} \gg |(\partial/\partial x) \varepsilon_1(x)|_{x_1}^{-1} \quad \text{для хвиль з кутами падіння } k_0/k_y \approx (\pi/2) k_y \varepsilon_0 |(\partial/\partial x) \varepsilon_1(x)|_{x_2}^{-1} \quad (8)$$

і генерація другої гармоніки зростає за порядком величини в $|\omega a/c|^4 \gg 1$ разів, то максимальний коефіцієнт трансформації за умови (8) можна визначити як:

$$\eta = \frac{(16\pi)^2 (\nu\sim)^2 \varepsilon_0 \varepsilon_{20}^2 (\sin \theta)^6 (\cos \theta)^4}{c^2 \left| \frac{c}{\omega} \nu.p. \int_0^a \frac{\kappa^2(x)}{\varepsilon_1(x)} dx \right|^4 (\varepsilon_{20} - \alpha^2)} \left\{ 1 + \left(\frac{(7\varepsilon_a + 9)}{\varepsilon_{2a}} \frac{3\pi}{16} k_y^2 L^2 \right)^2 \right\}, \quad (9)$$

де $\nu\sim = eH0 / m\omega$ – осциляторна швидкість електрона в полі падаючої хвилі з напруженістю магнітного поля $H0$, $\kappa^2(x) = k_y^2 - (\omega/c)^2 \varepsilon I(x)$, L – максимальне значення $|\partial \varepsilon I / \partial x| x l^{-1}$. Якщо у випадку немонотонного профілю плазми в зоні неоднорідності існує якесь число точок плазмового резонансу, а поза зоною плазма прозора, коефіцієнт трансформації енергії в другу гармоніку різко зростає при певних кутах падіння хвиль на неоднорідність. В разі немонотонного профілю густини плазми, який практично має місце на обмежуючих плазму поверхнях, легко реалізуються обидві умови $\varepsilon(x0) \sim 0$ та $|\partial \varepsilon / \partial x| \gg a$, коли значно посилюється вплив як нелінійних, так і лінійних ефектів, таких як поглинання електромагнітних хвиль.

Основний внесок в частку поглинутої енергії W вносять околиці резонансних точок шириною порядку $|\partial \varepsilon / \partial x| v_{eff} / \omega$, де v_{eff} – ефективна частота зіткнень, ω – частота хвилі. Величина поглинутої енергії в межі коли $v_{eff} \rightarrow 0$ не залежить від v_{eff} і посилення ефекту поглинання енергії обумовлено саме збільшенням зони взаємодії.

В разі реалізації умов $\varepsilon(x0) = 0$ та $|\partial \varepsilon / \partial x| = 0$, ширина зони взаємодії оцінюється як $|\partial \varepsilon / \partial x|^{-1/2} (v_{eff} / \omega)^{-1/2}$ та W зростає зі зменшенням v_{eff} (що аналогічно зростанню коефіцієнту поглинання хвиль, пов'язаного зі збудженням ленгмюрівських хвиль в теплій плазмі $v_{eff} / \omega \ll (r_{de} / a)^{2/3}$, де r_{de} – дебаївський радіус електронів), тобто, зі зменшенням температури, якщо в околиці резонансної точки знаходиться або точка максимуму, або точка перегину профілю плазми. Аналогічно ширина області взаємодії впливає на нелінійні ефекти в другому порядку теорії збурень, оскільки вони в даному випадку обумовлені розподілом електромагнітних полів в шарі на основній частоті. Для другої гармоніки в гарячій сильно неоднорідній плазмі $r_{de} / a \gg (v_{eff} / \omega)^{3/2}$, $a \ll c / \omega$ оцінка коефіцієнта трансформації в першому наближенні збігається з оцінкою для холодної плазми [2].

Досліджені нелінійні ефекти в шарі неоднорідної плазми поблизу обмежуючої поверхні, пов'язані з трансформацією електромагнітних хвиль і генерацією другої гармоніки височастотного (ВЧ) поля, розширюють спектр енергій захоплених електронів та розкид енергетичних характеристик іонно-плазмових потоків в напрямку вздовж поверхні. Врахування цих результатів забезпечує оптимізацію процесів передачі енергії зовнішнього ВЧ поля плазмі.

Третій розділ присвячено фізичним аспектам формування впорядкованих ієрархічних структур на поверхні твердого тіла з різною електропровідністю (діелектрики, напівпровідники, метали) під дією низькоенергетичних щільних іонно-плазмових потоків інертних газів з високим потенціалом іонізації (батутний ефект).

Експериментально ознаки батутного ефекту у взаємодії іонно-плазмового потоку з поверхнею твердого тіла проявляються у зміні спектру світіння плазми, в якому з'являються лінії збуджених атомів матеріалу мішені. Для зразків, наведених на Рис.10, батутний режим досягається, якщо густина іонного струму інертного газу на зразок перевищує приблизно 10 мА/см², а величина енергії іонів від 70 еВ до 100 еВ. Коли на поверхню зразка діє іонно-плазмовий потік з енергією іонів нижче за порогове значення виникнення батутного розпилення, то недостатня кількість атомів матеріалу зразка виходить в об'єм плазми і колір плазми відповідає світінню збуджених атомів плазмоутворюючого газу аргону (малиновий). Прояв батутного режиму з'являється зі зміною кольору світіння над мішенню до зеленувато-синього кольору світіння заліза в складі аустенітної неіржавіючої сталі марки 12Х18Н10Т.

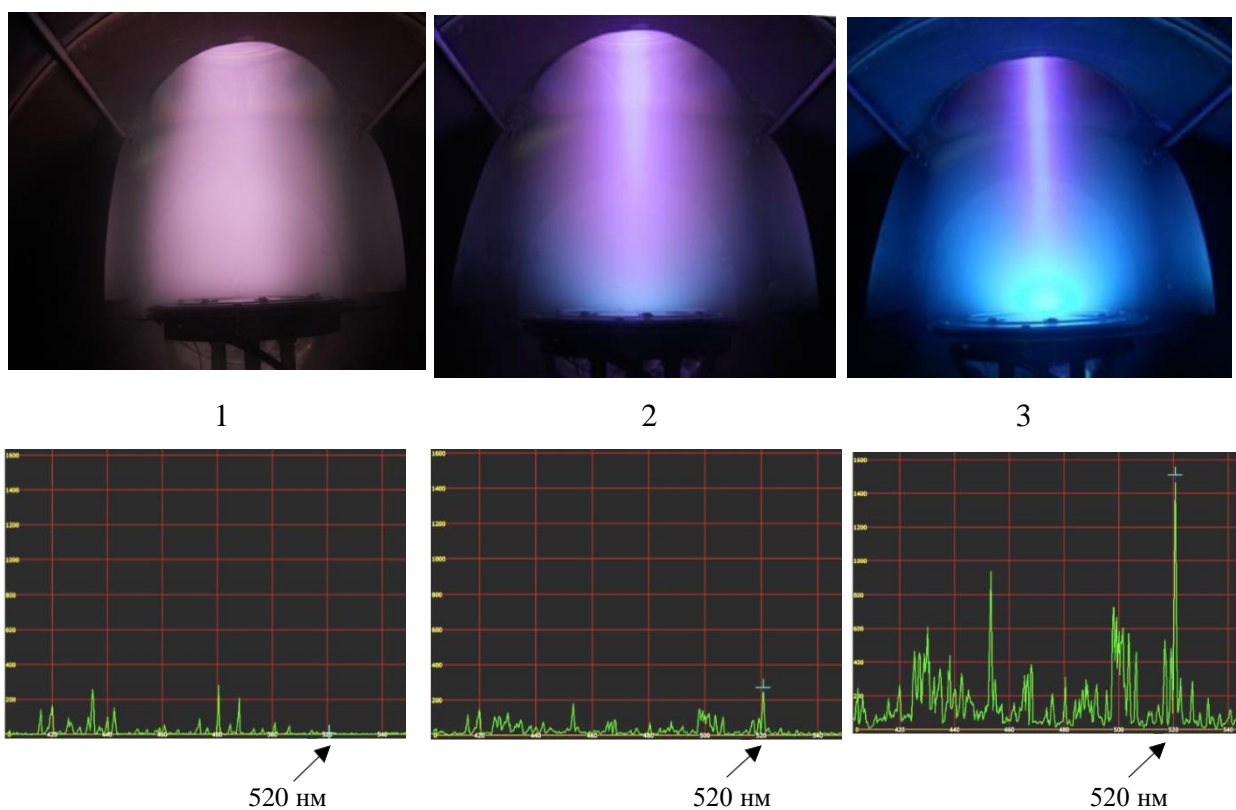


Рисунок 10 – Світіння плазми над мішенню з аустенітної неіржавіючої сталі 12X18H10T та відповідні спектри випромінювання, коли негативний електричний потенціал тримача підкладки досягає значень (1) – мінус 30 , (2) – мінус 70 та (3) – мінус 210 В.

Сутність дії батутного ефекту полягає в тому, що під час імпульсу, який діє на поверхню, теплова релаксація не встигає відвести енергію, що виділяється в малих об'ємах. Ефект аномального 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 шарів з ослабленими зв'язками в об'єм матеріалу й викликає їхній наступний викид стиснутими додатковим тиском нижніми шарами. Ефективність батутного розпилення визначається балансом наступних процесів:

- послаблюються поверхневі міжатомні зв'язки аж до переходу поверхневих шарів в квазірідинний стан;
- в паро-газовій фазі біля поверхні зростає концентрація атомів та субнанорозмірних конгломератів, що випаровуються з поверхні;
- збурюється поверхня та виникають зародкові наноструктури внаслідок поверхневої дифузії з врахуванням ефекту затінення, яка підсилюється дією іонного опромінення;
- змінюються електронні стани в зародкових нано-структурах, зменшується робота виходу електронів з нанорозмірних утворень на поверхні субмікронних структур, виникають умови для адгезії та появи гідрофільності поверхні;
- збільшується концентрація електронів біля поверхні внаслідок вторинної потенційної іон-електронної емісії, спричиненої зменшенням роботи виходу електронів;
- зростає швидкість іонізації частинок, що випаровуються з поверхневої квазірідини;
- стає більш інтенсивним процес переосадження іонізованих частинок, які випаровуються з поверхневих шарів на зародкові нано-структурні утворення;
- частинки випаровуються з усієї поверхні, а концентруються на зародкові наноструктури в зонах більш сильного електричного поля в околі змінених електронних станів поверхневих атомів локальних нано-утворень, тим самим формуючи поверхневі структури;

- ефект затінення також впливає на формування ієрархічної субмікронної структури з нанорозмірним рельєфом, бо в формуванні приймають участь не тільки частинки, що переосаджуються з приповерхневої зони, а й ті, що дифундують поверхнею;
- за умов сильних збурень відбувається відрив нано-розмірних утворень, обумовлюючи нанокластерне розпилення поверхневого шару матеріалу;
- нерівноважний стан поверхневих шарів твердого тіла «замерзає» після припинення іонного опромінення, демонструючи ієрархічну нано- і субмікронну структуру на поверхні.

Ці процеси дозволяють керовану ієрархічну нано- і субмікронну модифікацію поверхні та нанокластерне розпилення матеріалу мішені (разом батутний ефект) [5], що впливає на властивості матеріалів на різних рівнях шорсткості (Рис. 11 (1) - (3)).

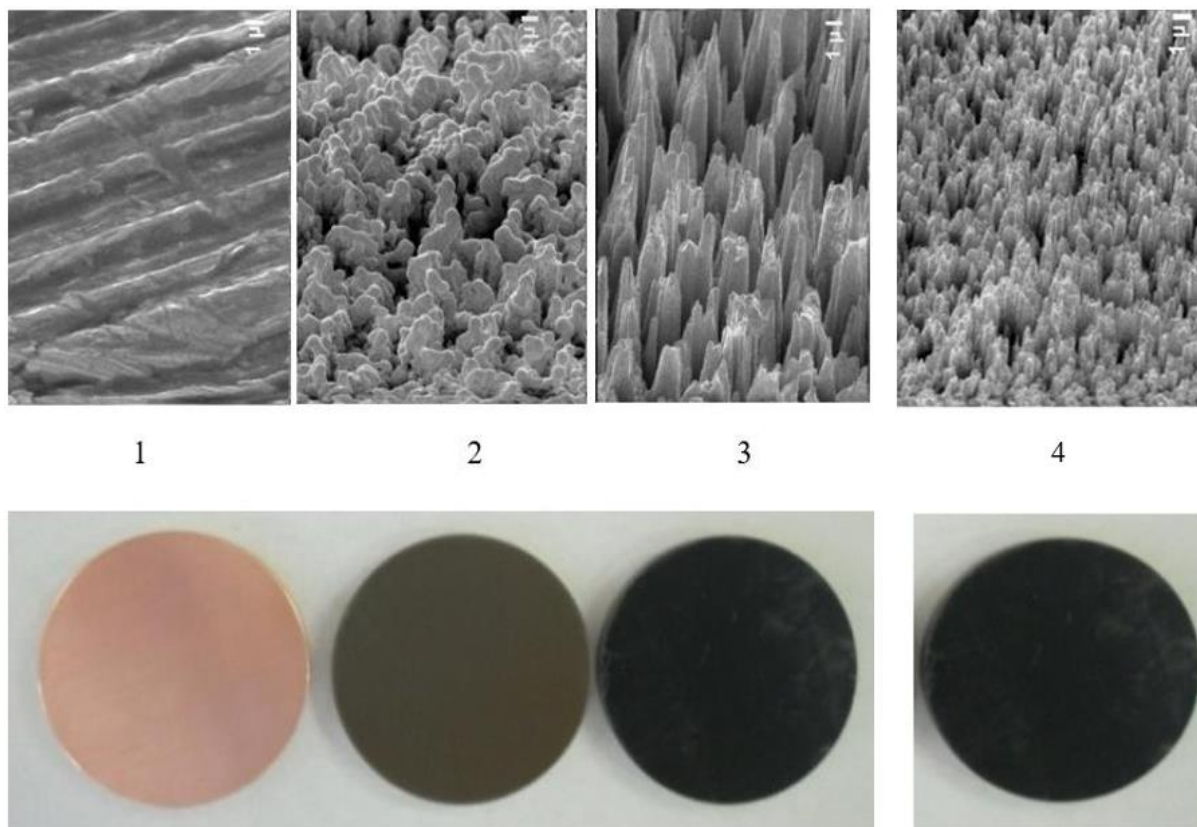


Рисунок 11 – Електронно-мікроскопічне зображення поверхні міді під дією іонно-плазмового потоку із збільшенням енергії потоку (1) – початковий стан, (2) – сформовані ієрархічні структури за енергії потоку 300 еВ, (3) – нарощені структури за енергії потоку 500 еВ, (4) – за енергії 500 еВ та попереднім нагрівом до 100 °С.

Встановлено, що швидкість розпилення практично не залежить від температури мішені, але температура зразка суттєво впливає на розміри поверхневих структур (Рис. 11 (4)). Показана зміна оптичних властивостей модифікованих поверхонь у видимому діапазоні довжин хвиль та можливість управління коефіцієнтом відбиття в інфрачервоній частині поверхні забезпечується також формуванням на ній плівки з властивостями сильної адгезії в процесі батутного нанокластерного розпилення мішені (Рис. 12).

Модифікація поверхні під дією потоків за параметрів батутного режиму розпилення здійснюється незалежно від типу провідності легованого кремнію та ступеня легування матеріалу. Електронна провідність поверхні сприяє швидкості формування та збільшенню характерного розміру поверхневих структур. Наприклад, в однакових умовах обробки на поверхні кремнію з дірковою провідністю характерний розмір утворень менший, ніж на

кремнію з електронною провідністю або на поверхні металу Cu. Перенос матеріалу нанокластерами забезпечує повторення в покритті складу та структури матеріалу багатокомпонентної мішені (Рис. 13). Результатами досліджень підтверджено відтворення просторової орієнтації в кремнієвій плівці за розпилення мішені з кремнію з орієнтацією (111) [8].

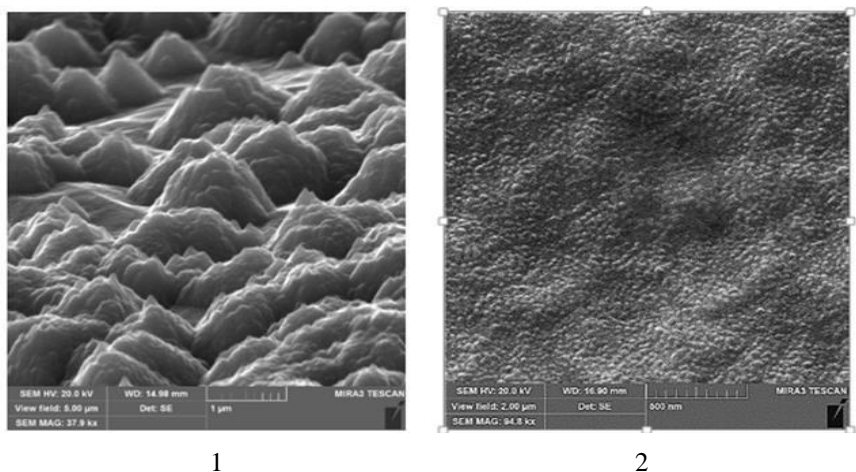


Рисунок 12 – Електронно-мікроскопічне зображення поверхні легованої сталі 38ХНЗМФ в процесі її модифікації. (1) – субмікронні структури з нанорозмірним рельєфом на модифікованій поверхні, (2) – сформована щільна плівка на модифікованій поверхні.

Модифіковану поверхню монокристалічного кремнію до стану «чорного кремнію» отримано за умови одночасного випарювання в робочій камері метала-ініціатора. Застосування міді як ініціатора дозволило зберегти та навіть збільшити значення часу життя неосновних носіїв заряду [10]. Показана можливість керувати розподілом легуючого елементу по товщині покриття та формувати поверхню з його однорідним розподілом по глибині [6, 8]. Також встановлено, що батутний режим обробки поверхонь демонструє вищу швидкість нанесення покриттів в порівнянні з PECVD та PVD процесами [8].

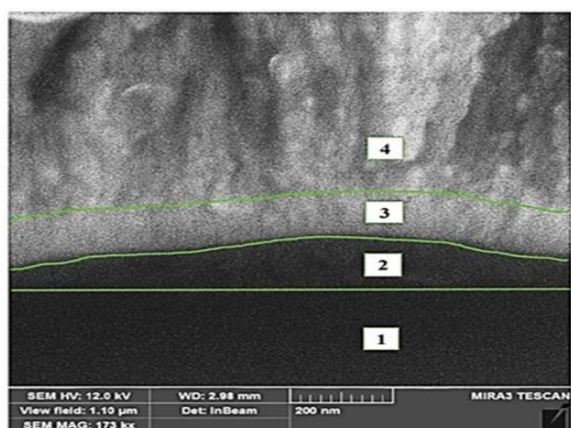
Виконані дослідження показують передбачену генієм Майкла Фарадея можливість існування особливого стану речовини – квазірідини в відомому ланцюгу: тверде тіло, рідина, газ, плазма [1*, 2*]. Раніше це було доведено для води та деяких інших речовин у режимі термодинамічної рівноваги [3*, 4*]. В даній роботі квазірідинний стан шарів на поверхні твердого тіла є нерівноважним і утворюється внаслідок впливу на поверхню щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків. Затверділа квазірідинна структура спостерігається *a posteriori* в електронному мікроскопі.

Дослідженнями визначено, що цільовими параметрами управління процесами модифікації поверхні твердого тіла є енергія іонно-плазмового потоку, температура поверхні, що обробляється та флюєнс, тобто час експозиції за незмінної густини потоку.

Четвертий розділ описує результати впливу дії щільних низько-енергетичних іонно-плазмових потоків на зміни морфології поверхні та фізико-механічних властивості модифікованої поверхні твердого тіла [11]. Показано, що для модифікованих поверхонь досягається адгезія матеріалів покриття та основи з відмінними фізичними властивостями, та в покритті відтворюється склад багатокомпонентної мішені – джерела матеріалу покриття. Внаслідок нанокластерного переносу матеріалу мішені на основу досягається висока швидкість формування покриття та його висока щільність.

На Рис. 13 показана зона {1} – поверхня розподілу скол-простір та зони {2}, {3} – перехідний шар, який є нано-структурованою поверхнею кремнієвої підкладки із взаємним

проникненням матеріалів підкладки і плівки, а також. зона {4} – плівка із аустенітної неіржавіючої сталі 12X18H10T.



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

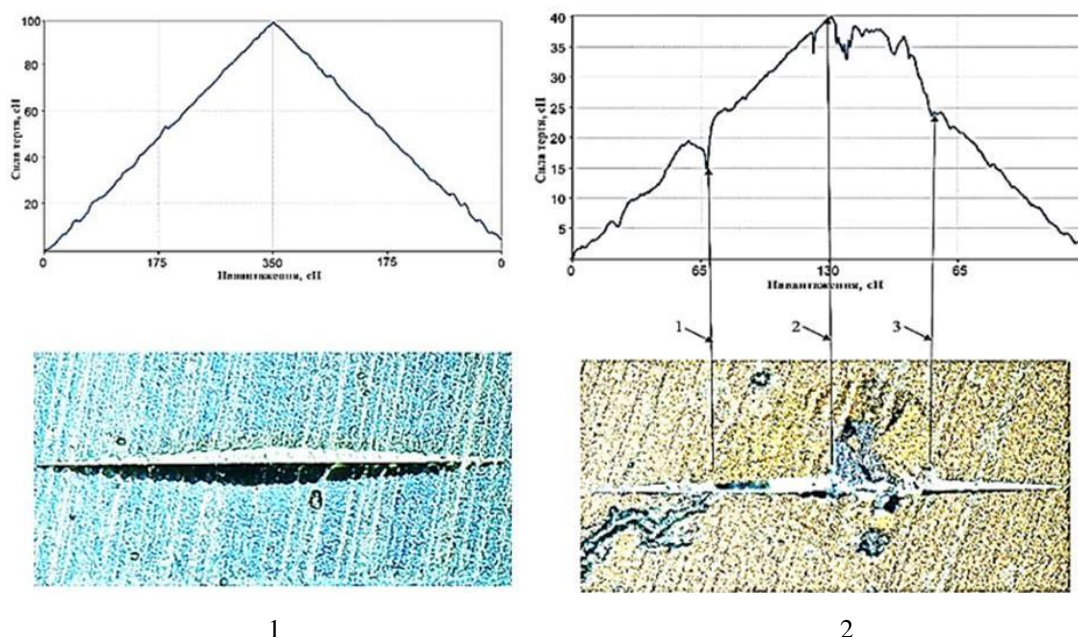
1

2

Рисунок 13 – (1) – Електронно-мікроскопічне зображення сколу пластини монокристалічного кремнію з наноструктурованою поверхнею та нанесеною на неї плівкою аустенітної неіржавіючої сталі марки 12X18H10T. (2) – Розподіл складу матеріалу по товщині.

На Рис.14 показана (1) – плівка із сталі 12X18H10T на модифікованій поверхні конструкційної сталі марки Ст3 без ознак відшарування плівки та (2) – відшарована плівка на немодифікованій поверхні (2) за тиску індентора $3,5 \times 10^3$ кГ/см² (вертикальна стрілка 1) та повністю зруйнована поверхня за тиску індентора $6,5 \times 10^3$ кГ/см² (вертикальна стрілка 2).

Головним чинником адгезії різномірних матеріалів є створення ієрархічної субмікронної структури з нанорозмірним рельєфом на модифікованій поверхні основи. Адгезія покриттів до основи додатково підсилюється утворенням зони взаємного проникнення матеріалів мішені та поверхні основи (Рис.13 (1), (2)). Із порівняння даних складу плівки в Зоні 4 та складу багатокомпонентної мішені, з якої формувалась плівка, видно відтворення в плівці складу багатокомпонентної мішені та зону взаємного проникнення, яка становить біля 150 нм.



1

2

Рисунок 14 – Результати сканування діамантовим індентором плівки із аустенітної неіржавіючої сталі 12X18H10T на конструкційній сталі марки Ст3.

Адгезія підтверджується прямим вимірюваннями на скретч тестері методом динамічного

сканування діамантовим індентором, коли плівка, сформована на модифікованій поверхні, демонструє монолітність з основою без будь-яких ознак відшарування за тиску індентора $17,5 \times 10^3 \text{ кГ/см}^2$ (Рис.14).

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено наукову задачу ефективного створення поверхневих ієрархічних субмікронних структур з нанорозмірним рельєфом для отримання високих експлуатаційних властивостей поверхонь твердого тіла для застосування в екологічно дружніх технологіях формування функціонально стабільних покриттів на поверхні твердих тіл. За результатами досліджень в дисертаційній роботі викладено наступні нові основні наукові результати:

1. Досліджено механізми передачі енергії від зовнішнього ВЧ джерела в плазму геліконного розряду з метою створення керованих щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків, які забезпечують оптимізацію експериментальних процесів передачі енергії зовнішнього ВЧ поля плазмі:

1.1 Виконано числові розрахунки параметрів плаского приелектродного шару для розв'язку гідродинамічних рівнянь переносу електронів та іонів в схрещених полях у випадку змінного струму поблизу електроду ВЧ розряду, що не емітує. В обраній моделі розв'язки визначались основним зовнішнім параметром – амплітудою струму в колі ВЧ генератора. Розрахунки підтвердили здатність приелектродного шару прискорювати іони до енергій у декілька десятків еВ для певних параметрів плазми та відносно низької енергії іонів порядку 1 еВ на межі приелектродного шару.

1.2 Встановлено визначальну роль магнітного поля як фактору, що регулює енергію іонного бомбардування.

1.3 Встановлено, що нелінійні ефекти в шарі неоднорідної плазми поблизу обмежуючої поверхні, які пов'язані з трансформацією електромагнітних хвиль і генерацією другої гармоніки ВЧ поля, розширюють спектр енергій захоплених електронів та розкид енергетичних характеристик іонно-плазмових потоків в напрямку вздовж поверхні.

1.4 Визначено коефіцієнт трансформації електромагнітної хвилі в другу гармоніку в зонах сильної неоднорідності з монотонним та немонотонним профілями плазми поблизу обмежуючої поверхні для холодної та гарячої плазми та ширину зони взаємодії.

2. Виявлено, в співавторстві з колективом дослідників – А.М. Габовичем, В.Ф. Семенюком – новий спосіб розпилення поверхні твердих тіл під дією керованих щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків (батутне розпилення).

2.1. Визначено фізичні аспекти батутного розпилення з застосуванням геліконного розряду.

2.2. Встановлено визначальну роль переосадження іонізованих розпилених частинок та термічно керованої поверхневої дифузії атомів, які самоузгоджено встановлюються в режимі батутного розпилення.

2.3. Виявлено цільові параметри управління процесом батутного розпилення та модифікації поверхонь твердих тіл (металів, напівпровідників та діелектриків) – енергія іонно-плазмового потоку, температура поверхні, яка обробляється, та флюєнс.

3. Визначено дію щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків, які забезпечують модифікацію поверхні твердого тіла без впливу на об'єм, на фізико-механічні характеристики функціональних покриттів. Підтверджено перенос матеріалу, який розпилюється і є джерелом матеріалу покриття, у вигляді нанокластерів, тому відбувається

відтворення в покритті складу і структури багатокомпонентного матеріалу мішені для плівок з металів, наприклад, аустенітна неіржавіюча сталь 12X18H10T, конструкційна сталь марки Ст3, мідь, напівпровідників з різним типом провідності, наприклад, монокристалічний кремній c-Si з електронною провідністю марки КДБ 4,5 та марки КЕМ 0,002 з дірковою провідністю та діелектриків, наприклад, перовскітна кераміка $\text{La}_{0,56}\text{Li}_{0,33}\text{TiO}_3$.

3.1. Виявлено можливість модифікації поверхні металів, наприклад, конструкційної сталі марки Ст3, легованої сталі 38ХН3МФ та міді, напівпровідників з різним типом провідності, наприклад, монокристалічного кремнію з електронною провідністю марки КЕМ 0,002 та марки КДБ 4,5 з дірковою провідністю та діелектриків, наприклад, перовскітної кераміки $\text{La}_{0,56}\text{Li}_{0,33}\text{TiO}_3$.

3.2. Встановлено можливість формування покриттів з рівномірним розподілом легуючої домішки по глибині плівки.

3.3. Досягнуто високої щільності покриття та адгезії покриття до основи. Показано існування зони проникнення матеріалів покриття в поверхню, що підсилює адгезивні властивості покриття.

3.4. Виявлено можливість формування багатокомпонентних різнорідних покриттів, які міцно зв'язані з основою, що забезпечує адгезію.

3.5. Підтверджено здатність нанесеної плівки із аустенітної сталі марки 08X18H10T витримувати екстремальні навантаження без будь-яких ознак руйнування.

3.6. Досягнуто високу швидкість розпилення та, відповідно, швидкість формування покриттів в режимі батутного розпилення в порівнянні з процесами плазово-активованого хімічного парового осадження (PECVD) та фізичного парового осадження (PVD).

Результати досліджень дозволили оптимізувати конфігурацію електродної системи геліконного джерела іонно-плазового потоку для отримання параметрів, потрібних для реалізації батутного механізму розпилення. Батутний режим обробки з використанням керованих щільних низькоенергетичних іонно-плазових потоків, багатофункціональний за своїми можливостями, він дозволяє ефективно розпилювати матеріали мішеней з провідників, напівпровідників та діелектриків та формувати щільні високоадгезивні покриття на різних за властивостями матеріалах з перенесенням в плівку складу багатокомпонентного матеріалу мішені, що розпилюється. Отримані результати відкривають перспективу промислового широкомасштабного використання технологій батутної модифікації поверхонь в іонно-плазовій інженерії формування покриттів з заданими функціонально стабільними властивостями для цілей отримання «чорного кремнію» для фотовольтаїчних елементів, літій-іонних батарей великої питомої ємності, створення функціонально стабільних покриттів на внутрішній поверхні просторово-обмежених конфігурацій з великим аспектним відношенням довжини до діаметру тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. J. Frenkel, A general theory of heterophase fluctuations and pretransition phenomena. //J.Chem. Phys.–1939 – Vol. 7, p. 538. <https://doi.org/10.1063/1.1750484>.
- 2*. J. Frenkel, Kinetic Theory of Liquids. // Dover Publications, Mineola, New York – 1955.
- 3*. A. R. Ubbelohde, Melting and crystal structure. // Quart. Rev. Chem. Soc. - 1950 - Vol. 4, p.356. <https://doi.org/10.1039/QR9500400356>.
- 4*. V. I. Yukalov, Phase transitions and heterophase fluctuations, Phys. Rep. - 1991 - Vol. 208, p. 395. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(91\)90074-V](https://doi.org/10.1016/0370-1573(91)90074-V).

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України та інших держав

1. Т. А. Давыдова, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк). Генерация второй гармоники электромагнитной волны из области плазменного резонанса в сильно неоднородной плазме. // Украинский Физический Журнал – 1976 – Т. 21, № 10, с. 1658-1665 – ISSN 0503-1265 (Ukrainian Journal of Physics - ISSN 2071-0186, ISSN 0372-400X).
2. Т. А. Давыдова, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк). Генерация второй гармоники при падении электромагнитной волны на горячую сильно-неоднородную плазму. // Украинский Физический Журнал – 1981 – Т. 26, № 3, с. 388-393 – ISSN 0503-1265 (Ukrainian Journal of Physics - ISSN 2071-0186, ISSN 0372-400X).
3. А. А. Гурин, И. И. Пасечник, В. Ф. Семенюк, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк), В. В. Ягола. О влиянии приэлектродного слоя ВЧ разряда в магнитном поле на энергию ионов. // Журнал Технической Физики – 1985 – Т. 55, № 4, с. 783-786 (Journal of Technical Physics, ISSN-L 0044-4642).
4. А. А. Гурин, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк). Динамика приэлектродного слоя ВЧ разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. // Физика плазмы – 1985 – Т. 11, № 2, с. 244- 249 – ISSN 0367-2921 (Soviet Journal of Plasma Physics - ISSN 0360-0343).

Статті в індексованих у Scopus і/або Web of Science виданнях

5. Alexander M. Gabovich, Valerii F. Semeniuk, Nadiia I. Semeniuk. New collective trampoline mechanism of accelerated ion-plasma sputtering // Journal of Physics D: Applied Physics – 2019 – Vol. 18, pp. 185201-185215 – doi: 10.1088/1361-6463/ab05a1 – ISSN 0022-3727 – Q1.
6. A. M. Gabovich, O. Yo. Gudymenko, V. P. Kladko, P. M. Lytvyn, Iu. M. Nasieka, B. M. Romaniuk, V. F. Semeniuk, N. I. Semeniuk, V. V. Strelchuk, V. I. Styopkin, and V. M. Tkach. Nano-sized Structure Formation by Trampoline Ion-Plasma Sputtering, // Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii. – 2020 – Vol. 18, Issue 2, pp. 357-372 – ISSN 1815-5230 – Q3.
7. Alexander M Gabovich; Valerii F Semeniuk; Nadiia I Semeniuk. Effect of trampoline sputtering on surface morphology and coatings properties, // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021 – Vol. 25, pp. 255301-255314 – doi: 10.1088/1361-6463/abf0ee – ISSN 0022-3727 – Q1.
8. Vyacheslav N. Gorshkov, Mykola O. Stretovych, Valerii F. Semeniuk, Mikhail P. Kruglenko, Nadiia I. Semeniuk, Victor I. Styopkin, Alexander M. Gabovich, Gernot K. Boiger. Hierarchical Structuring of Black Silicon Wafers by Ion-Flow-Stimulated Roughening Transition: Fundamentals and Applications for Photovoltaics. // Nanomaterials. – 2023 – Vol. 19, pp. 2715-2738 – doi:10.3390/nano13192715 – ISSN 2079-4991 – Q1.
9. Alexander M. Gabovich, Vitaliy P. Kostilyov, Mykhailo P. Kruglenko, Valerii F. Semeniuk, Nadiia I. Semeniuk, Sergei I. Sidorenko, Victor I. Styopkin, Alexander I. Voitenko, and Svitlana M. Voloshko. Black silicon: formation in the trampoline mode of ion flow, surface properties, and performance perspectives. // Low Temp. Phys. – 2025 - Vol. 51, Issue 1, pp. 533-542 – doi:10.1063/10.0036443 – ISSN 1063-777X – Q3.
10. Valerii F. Semeniuk, Alexander M. Gabovich, Vyacheslav N. Gorshkov, Mykhailo P. Kruhlenko, Oleksandr V. Kurochkin, Vassili G. Nazarenko, Nadiia I. Semeniuk, Mykola O. Stretovych, Victor I. Styopkin, and Alexander I. Voitenko. Self-ordering of metallic surfaces in the trampoline-structuring regime. // Journal of Applied Physics. – 2025 – Vol. 138, pp. 135301(1)-135301(20) – doi: 10.1063/5.0295415 — ISSN 0021-8979 – Q2.

Праці апробаційного характеру

11. А. А. Гурин, В. П. Катюха, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк). Колебательные свойства приэлектродной области ВЧ разряда в магнитном поле. // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой". Ташкент. – 1985 – с. 225-228.

12. А. А. Гурин, Н. И. Чернова (Н. И. Семенюк). Численное моделирование процессов многокомпонентной плазмы ВЧ тлеющего разряда. // Республиканская научно-техническая конференция «Экспериментальные исследования и математические модели физико-химических процессов в сплошных средах». Киев. – 29 мая-01 июня 1985 года.
13. А. А. Гурин, Н. И. Семенюк. Моделирование процессов в ВЧ магнетронном разряде - источнике многокомпонентной плазмы. // IV Всесоюзное совещание «Математическое моделирование физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах». Туапсе. – 14-18 мая 1990 года.
14. V. Semeniuk, M. Drobkov, Yu. Naseka, N. Semeniuk, V. Strelchuk. Deposition of Carbon Structures Composites in Helicon-Arc Plasma System. // IX International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC 2015), Shizuoka GRANSHP, Japan – 24th - 28th May 2015.
15. Олександр М. Габович, Валерій Ф. Семенюк, Надія І. Семенюк. Новий фізичний ефект А. колективний батутний механізм прискореного іонно-плазмового розпилення. // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, Київ, Україна. – 11-12 грудня 2019 року – с. 23.
- B. M. Gabovich, O. Yo. Gudymenko, V. P. Kladko, P. M. Lytvyn, Iu. M. Nasieka, B. M. Romaniuk, V. F. Semeniuk, N. I. Semeniuk, V. V. Strelchuk, V. I. Styopkin, and V. M. Tkach. Nano-sized structure formation by trampoline ion-plasma sputtering. // VI Наукова конференція
16. «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» (НАНСИС 2019), Київ, Україна. – 4-6 грудня 2019 року – с. 39.
17. M. Gabovich, V. F. Semeniuk, N. I. Semeniuk New phenomenon: collective trampoline mechanism of accelerated ion-plasma sputtering. // International Conference of Young Scientists and Post-Graduates Institute of Electron Physics, National Academy of Science of Ukraine, Uzhhorod. – 21-24 May 2019, – pp. 144-147.
18. Габович О. М., Семенюк В. Ф., Семенюк Н. І.. Модифікація поверхні пластин чорного кремнію для фотовольтаїки методом батутного розпилення. // VI Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка». Міністерство освіти і науки України, Кременчуцький національний університет. Кременчук. – 14-16 травня 2020 року – с. 53-54.

АНОТАЦІЯ

Семенюк Н.І. «Управління морфологією та фізико-механічними властивостями поверхні твердих тіл під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків». – **Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07, – фізика твердого тіла, – Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вивченню процесів утворення на поверхні твердих тіл ієрархічних субмікронних структур з нанорозмірним рельєфом для цільового управління фізико-механічними властивостями поверхні внаслідок модифікації поверхні до бажаного стану під дією щільних низько-енергетичних іонно-плазмових потоків.

Представлені результати дослідження механізмів передачі енергії від зовнішнього джерела в плазму з метою створення щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків. Це стосується як прискорення іонів в приелектродному шарі ВЧ розряду в магнітному полі, так і плазмово-хвильовому механізму передачі енергії в плазмовий потік, а також фізичним

аспектам формування функціонально стабільних покриттів на поверхні твердого тіла з різною електропровідністю (метали, напівпровідники, діелектрики).

Із застосуванням геліконного іонно-плазмового джерела виявлено новий батутний режим обробки поверхні низькоенергетичним іонним струмом високої густини, котрий забезпечує послаблення зв'язків поверхневих атомів до стану квазірідини. Визначені цільові параметри управління режимами - енергія іонного потоку, температура зразка та флюєнс, які дозволяють керовано створювати поверхневі ієрархічні мікроструктури.

Представлено результати застосування батутного режиму для створення покриттів з адгезією матеріалів з відмінними фізичними властивостями та з відтворенням в покритті складу та структури багатокомпонентної мішені. Показано, що внаслідок нанокластерного переносу матеріалу мішені на основу досягається висока швидкість формування покриття та його висока щільність. Це відкриває перспективу промислового використання енерго-ощадливої та екологічно дружньої батутної технології для формування функціонально стабільних покриттів, що мають працювати в екстремальних умовах.

Ключові слова: батутне розпилення, тверде тіло, модифікація поверхні, квазірідина, нанорозмірні структури, субмікронні структури, іонно-плазмові потоки, трансформація хвиль, приелектродні шари.

ABSTRACT

Semenyuk N.I. "Controlling of Morphology and Physical-Mechanical Properties of the Surface of Solids under the Action of Dense Low-Energy Ion-Plasma Flows" – Qualifying scientific paper printed in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences for the specialty 01.04.07 – Solid State Physics, G. V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to the development of processes for the creation on the surface of solid bodies the hierarchical submicron structures with nanoscale relief for the purposeful control of physical and mechanical properties of the surface. Modification of the surface of the solid state occurs under the influence of dense low-energy ion-plasma flows that interact with the surface of the solid. The dissertation work consists of four sections.

The first section contains a review of literature sources related to the current state of the issue. Micro- and nanoscale structures on solid surfaces can be created using concentrated flows, most often ion beams or laser irradiation were used for this. The applied methods affected both the surface and the near-surface layer of the bulk material, which determined the excess energy consumption compared to the necessary costs for modifying the surface directly, without affecting the volume of the solid. This arise a question if it possible to put the focus on the surface processing only without influencing the volumetric material and the importance to look for of a new method and its main control parameters of management.

The second section includes the results of the study of mechanisms for transferring energy from an external RF source to the plasma in order to create dense low-energy ion-plasma flows that provide modification of the surface of a solid without affecting the volume. This applies to both the acceleration of ions in the near-electrode layer of an RF discharge in a magnetic field and the plasma- wave mechanism of energy transfer to the plasma flow with an expansion of the energy range due to the expansion of the frequency spectrum of the intrinsic plasma waves.

The third section is devoted to the physical aspects of the formation of ordered hierarchical structures on the surface of a solid with different electrical conductivity (dielectrics, conductors, metals). The source of the ion-plasma flow with unique parameters was a resonant helicon discharge, in which the plasma flow was formed due to the plasma-wave acceleration mechanism and additional

acceleration of ions in dynamic near-surface layers of inhomogeneous plasma. The presence of that ion-plasma source made it possible to use a new trampoline sputtering mode of surface treatment with a high-density low energy ion flow. In this case, the cumulative effect of the “dense rain” of ions should initiate an avalanche-like decrease in the surface cohesion energy and causing a rapid ejection of material. Trampoline sputtering is realized provided that the ion current density in the plasma flow is not less than 10 mA/cm^2 , and for a threshold specific power of the ion flux from 0.7 to 2.0 W/cm^2 , depending on the target material. The high potential energy of ions bombarding the surface (ionization energy) and a rather moderate, but sufficient (existence of a threshold!), their kinetic energy are the determining factors of the new sputtering mode. In fact, because of trampoline sputtering, a quasi-liquid (pre-melted) state of matter is formed on the surface. Experimental realization of trampoline sputtering regardless of the type of solid (metal, semiconductor, or dielectric) was achieved by using plasma-forming gases with high ionization potentials in ion-plasma flows with ion current densities of more than 10 mA/cm^2 and energies of tens to hundreds of electron-volts.

The fourth section describes the results of the influence of the applied methods, namely, irradiation of the solid surface to changes of the surface morphology and physical-mechanical properties of the modified solid surface. For modified surfaces, adhesion of materials with excellent physical properties (between the coating and the base) is achieved. Because of the nanocluster transfer of the target material to the base, a high rate of coating formation and its high density achieved, and the composition of the multicomponent target, the source of the coating material, is reproduced in the coating. Modification of the solid surface under the action of ion-plasma flows under the trampoline sputtering mode allowed for the controlled creation of surface structures with a hierarchy from nanoscale to submicron scales, which affects the properties of materials as a result of simultaneous structuring of the surface to different levels of roughness. In addition, the speed of the formation processes of functional coatings increases significantly. The possibility productive application of the trampoline technology in ion-plasma surface engineering of creating adhesive functionally stable coatings with the preservation of the composition and properties of multicomponent consumables in thick films was shown. This opens up the prospect of industrial large-scale use of energy-preserving and ecologically friendly trampoline surface modification technologies to create coatings with specified functional properties.

Keywords: trampoline sputtering, solid, surface modification, quasi-liquid, nanoscale structures, submicron structures, ion-plasma flows, wave transformation, near-electrode layers.