

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0824U000450

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 17-01-2024

**Статус:** Наказ про видачу диплома

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:** Наказ ХНУ імені В. Н. Каразіна № 0302-Зк/356 від 13.03.2024 р.



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Єфименко Ніна Олександрівна

2. Nina Yefymenko

**Кваліфікація:**

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-6114-6394

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Шифр наукової спеціальності:** 105

**Назва наукової спеціальності:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Галузь / галузі знань:**

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Дата захисту:** 21-02-2024

**Спеціальність за освітою:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Місце роботи здобувача:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

### III. Відомості про дисертацію

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ID 3899

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

### IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

### V. Відомості про дисертацію

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 29.27.03, 29.27.23, 29.27.43, 29.27.49

**Тема дисертації:**

1. Формування комбінованих потоків активованих частинок в плазмових системах зі схрещеними ен-полями для синтезу наноструктурних покриттів
2. The formation of combined flows of activated particles in plasma systems with crossed EH fields for the synthesis of nanostructured coatings

**Реферат:**

1. Дисертаційну роботу присвячено дослідженням процесів генерації та транспортування потоків іонів, електронів і хімічно активних частинок в кластерній іонно-плазмовій системі (КІПС) та в комбінованій магнетронній іонно-променевої / плазмовій системах (МІПС) зі схрещеними ЕН полями для синтезу складно-композиційних наноструктурних покриттів. На першому етапі роботи було проведено експериментальні дослідження інтегральних характеристик магнетронного та ВЧ індукційного розрядів в КІПС. Також були виміряні локальні параметри плазми і потоків заряджених частинок (температури і густини електронів і іонів); визначенні енергетичні спектри іонів і просторові розподіли густини іонного

струму. Було синтезовано одношарові і багатшарові покриття з оксидів алюмінію та танталу і вивчено їх фізичні та трибологічні властивості, визначено оптимальне «технологічне вікно» та зроблено рекомендації щодо отримання стехіометричних покриттів з пентооксиду тантала в КІПС. Також, на основі досліджень плазми проведено оснащення КІПС додатковим обладнанням для контролю і моніторингу в часі ключових параметрів технологічного процесу нанесення покриттів на зразки та медичні вироби для імплантології. Другий етап роботи було присвячено комплексним експериментальним і технологічним дослідженням новітньої комбінованої магнетронної іоннопроменевої системи (МІПС). В МІПС магнетронний розряд було поєднано з джерелом іонів холлівського типу, налаштованому на роботу в прискорювальному режимі. В цьому режимі було сформовані щільні, надтверді покриття з високою внутрішню напругою типу TiN та  $Al_2O_3$ . Було доведено можливість контролювати кінетику росту стехіометричних покриттів з  $Al_2O_3$  при знижених температурах і отримати аморфні або нанокристалічні (розміром 10-12 нм) плівки з  $\alpha$  та  $\beta$  фазами оксиду алюмінія. Було продемонстровано переваги МІПС перед магнетронним розрядом, а саме: - зниження тиску робочого газу для запалювання розряду в 1,5-2 рази; - зменшення напругу магнетронного розряду на (50-100) В і стабілізація його роботи при тисках газу, менших за 1 мТорр; - можливість компенсації струму іонного пучка потоком електронів з магнетронної плазми і синтезу тонких діелектричних плівок без пошкоджень; - можливість проводити реактивний іонно-плазмовий синтез стехіометричних покриттів при параметрах поза зони пасивації мішені магнетрона. Також в результаті проведених досліджень отримано послідовний синтез аморфної,  $\alpha$  - та  $\beta$  - фаз оксиду алюмінію за участю іонного бомбардування в МІПС при температурі зразків меншої 500° С. На третьому етапі роботи було експериментально досліджено іонноплазмову модифікацію МІПС, яка призначена для синтезу покриттів з низькою енергією іонів (10-100) еВ додаткового бомбардування, але з високою густиною струму до 20 мА/см<sup>2</sup>. Цей діапазон параметрів іонного бомбардування є необхідним для нанесення покриттів без внутрішніх напружень на термочутливі матеріали. Було експериментально доведено можливість формування при анодного шару електронів в плазмовому режимі роботи джерела іонів холлівського типу без розжарювального катоду завдяки інжекції електронів з магнетронного розряду. Вперше експериментально встановлено самоузгоджене керування напругою при анодного шару електронів в джерелі іонів холлівського типу в плазмовому режимі за допомогою магнітного поля. Таким чином, в комбінованій МІПС отримано направлений компенсований іон-електронний потік з керованою енергією іонів в діапазоні (30-500) еВ і густиною струму до 30 мА/см<sup>2</sup>. На четвертому етапі роботи було розроблено феноменологічну просторовоусереднену модель комбінованого газового розряду в ЕН полях, яка побудована на загально визнаних в фізиці газового розряду і низькотемпературної плазми величинах. Було виявлено енергетично оптимальний режим роботи системи з максимальним струмом при мінімальній напрузі розряду та визначено параметри, які впливають на величину катодного і анодного падіння потенціалу. В цілому модель, якісно та кількісно пояснює основні характеристики роботи комбінованої МІПС від зовнішніх параметрів: тиску робочого газу, електричної потужності та магнітного поля. Таким чином експериментально доведено і теоретично обґрунтовано нову концепцію комбінованої МІПС. Тематика роботи і отримані результати становлять інтерес не тільки для фундаментальної фізики газового розряду і низькотемпературної плазми в магнітному полі, а є актуальними для розробки нової генерації іонно-плазмового обладнання для мікро- і нанотехнологій.

2. The dissertation is devoted to the research of the processes of generation and transport of flows of ions, electrons and chemically active particles in the cluster ionplasma system (CIPS) and in the combined magnetron ion-beam / plasma systems (MIPS) with crossed EH fields for the synthesis of complex-composite nanostructured coatings. At the first stage of the work experimental studies of integral characteristics of magnetron and RF induction discharges in CIPS were carried out. The local parameters of the plasma and flows of charged particles (temperature and density of electrons and ions) were also measured; determining energy spectra of ions; spatial distributions of the ion current density were measured. As a result of the first stage of work, single-layer and multilayer coatings from aluminum and tantalum oxides were synthesized and their physical and tribological properties were studied. The optimal "technological window" was determined, and recommendations were made for obtaining stoichiometric coatings from tantalum pentoxide in CIPS. Also, on the basis of plasma research, CIPS

was equipped with additional equipment for control and monitoring in time of key parameters of the technological process of coating samples and medical products for implantology. The second stage of the work was devoted to comprehensive experimental and technological research of the latest combined magnetron ion-beam system (MIPS). In the MIPS, the magnetron discharge was combined with a Hall-type ion source configured to operate in the accelerating mode. In this regime, it was possible to form dense, superhard coatings with high internal stress such as TiN and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. It was also proven that it was possible to control the growth kinetics of stoichiometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings at low temperatures and obtain amorphous or nanocrystalline (10-12 nm in size) films with  $\alpha$  and  $\beta$  phases aluminum oxide. Also, the simultaneous operation of the magnetron discharge and the ion source demonstrated the advantages of MIPS over the magnetron discharge, namely: - reducing the working gas pressure for igniting the discharge by 1.5-2 times; - reduction of magnetron discharge voltage by (50-100) V and stabilization of its operation at gas pressures less than 1 mTorr; - the possibility of compensating the ion beam current with the flow of electrons from the magnetron plasma and synthesizing thin dielectric films without damage; - the possibility to carry out reactive ion-plasma synthesis of stoichiometric coatings at parameters outside the passivation zone of the magnetron target. Also, as a result of the conducted research, a sequential synthesis of amorphous,  $\alpha$  - and  $\beta$  - phases of aluminum oxide was obtained with the participation of ion bombardment in MIPS at a sample temperature of less than 500°C. At the third stage of the work, the ion-plasma modification of MIPS was experimentally investigated, which is intended for the synthesis of coatings with low ion energy (10-100) eV of additional bombardment, but with a high current density of up to 20 mA/cm<sup>2</sup>. This range of ion bombardment parameters is necessary for applying coatings without internal stresses on thermosensitive materials. The possibility of forming the anode layer of electrons in the plasma mode of operation at the Hall-type ion source without a glowing cathode due to the injection of electrons from a magnetron discharge was experimentally proven. For the first time, self-consistent control of the voltage at the anode layer of electrons in the Hall-type ion source in the plasma mode using a magnetic field was established experimentally. Thus, a directional compensated ion-electron flow with a controlled ion energy in the range (30-500) eV and a current density of up to 30 mA/cm<sup>2</sup> was obtained in the MIPS. At the fourth stage of the work, a phenomenological spatially averaged model of the combined gas discharge in EH fields was developed, which is built on generally recognized values in the physics of gas discharge and low-temperature plasma. The energetically optimal operating mode of the system with the maximum current at the minimum discharge voltage was found, and the parameters that affect the magnitude of the cathodic and anodic potential drop were determined. In general, the model qualitatively and quantitatively explains the main characteristics of the combined MIPS operation from external parameters: working gas pressure, electric power and magnetic field. In this way, a new concept of combined MIPS was experimentally proven and theoretically substantiated. The topic of the work and the obtained results are of interest not only for the fundamental physics of gas discharge and low-temperature plasma in a magnetic field, but are relevant for the development of a new generation of ion-plasma equipment for micro- and nanotechnologies.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

**Публікації:**

- Zykov A., Yefymenko N., Dudin S., Yakovin S., Azarenkov M. Generation of compensated ion-electron flow in the combined magnetron-ion-plasma system // Problems of Atomic Science and Technology 6, p. 90-95 (2023).
- Dudin S., Yakovin S., Zykov A., Yefymenko N. Optical and mass spectra from reactive plasma at magnetron deposition of tantalum oxynitride // Problems of Atomic Science and Technology 131(1), p. 122-126 (2021).
- Zykov A., Yefymenko N., Dudin S., Yakovin S. Discharge characteristics of combined low energy ion source – magnetron sputtering system // Problems of Atomic Science and Technology 130(6), p. 169-173 (2020).
- Yakovin S., Zykov A., Dudin S., Dakhov A., Yefymenko N. Investigation of interaction between ion-beam plasma and processed surface during the synthesis of tantalum diboride and pentaoxide // Problems of Atomic Science and Technology 119(1), p. 229-232 (2019).

**Наукова (науково-технічна) продукція:** матеріали; методи, теорії, гіпотези

**Соціально-економічна спрямованість:**

**Охоронні документи на ОПВ:**

**Впровадження результатів дисертації:** Впроваджено

**Зв'язок з науковими темами:** 0117U004855; 0120U102129; 0122U001658; 2021.01/0204

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Зиков Олександр Володимирович
2. Oleksandr Zykov

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.08

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-5409-2655

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

**Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Кузьмичев Анатолій Іванович
2. Anatoly Kuzmichev

**Кваліфікація:** д. т. н., професор, 05.27.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-0087-275X

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Махлай Вадим Олександрович

2. Vadym O. Makhlai

**Кваліфікація:** к. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 01.04.08

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-5258-7793

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" Національної академії наук України

**Код за ЄДРПОУ:** 14312223

**Місцезнаходження:** вул. Академічна, буд. 1, Харків, Харківський р-н., 61108, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Академічний

**Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Лісовський Валерій Олександрович

2. Valerii Lisovski

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 01.04.08

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-6339-4516

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Литовченко Сергій Володимирович

2. Serhiy Lytovchenko

**Кваліфікація:** д. т. н., професор, 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-3292-5468

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Сектор науки:** Університетський

## VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Гірка Ігор Олександрович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Гірка Ігор Олександрович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Шевченко Андрій Олександрович

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна