

## ІОННО-ПЛАЗМОВА СИСТЕМА ДЛЯ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

С. Д. Яковін, О. В. Зиков, С. В. Дудін, В. І. Фаренік<sup>1</sup>, М. М. Юнаков

*Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна,  
Харків, Україна,*

*<sup>1</sup>Науковий фізико-технологічний центр МОН та НАНУ,  
Харків, Україна*

Надійшла до редакції 22. 09. 2014

В роботі представлено результати розробки та дослідження багатофункціональної іонно-плазмової технологічної системи, до складу якої входять наступні компліментарні плазмові модулі: два незбалансованих магнетрони низького тиску; джерело плазми та активованих частинок на базі ВЧ індукційного розряду; джерело іонів середніх енергій на базі розряду в схрещених ЕН полях; система імпульсної поляризації зразків. Було досліджено характеристики окремих плазмових модулів та показано можливість їх сумісної дії в процесах реактивного іонно-плазмового синтезу покриттів. Робочий діапазон параметрів багатофункціональної іонно-плазмової технологічної системи дозволяє в єдиному циклі проводити очистку та активацію поверхні, що обробляється, наносити металеві, діелектричні складнокомпозиційні та багатошарові покриття з унікальними властивостями.

**Ключові слова:** реактивний синтез, складнокомпозиційні сполуки, ВЧ індукційний розряд, магнетрон, джерело іонів.

## ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

С. Д. Яковин, А. В. Зыков, С. В. Дудин, В. И. Фареник, Н. Н. Юнаков

В работе представлены результаты разработки и исследования многофункциональной ионно-плазменной технологической системы, в состав которой входят следующие комплементарные плазменные модули: два несбалансированных магнетрона низкого давления; источник плазмы и активированных частиц на базе ВЧ индукционного разряда; источник ионов средних энергий на базе разряда в скрещенных ЕН полях; система импульсной поляризации образцов. Были исследованы характеристики отдельных плазменных модулей и показана возможность их совместного действия в процессах реактивного ионно-плазменного синтеза покрытий. Рабочий диапазон параметров многофункциональной ионно-плазменной технологической системы позволяет в едином цикле проводить очистку и активацию обрабатываемой поверхности, наносить металлические, диэлектрические, сложнокомпозиционные и многослойные покрытия с уникальными свойствами.

**Ключевые слова:** реактивный синтез, сложнокомпозиционные соединения, ВЧ индукционный разряд, магнетрон, источник ионов.

## ION-PLASMA SYSTEM FOR REACTIVE MAGNETRON DEPOSITION

S. D. Yakovin, A. V. Zykov, S. V. Dudin, V. I. Farenik, N. N. Yunakov

The paper presents the results of research and development of multi-functional ion-plasma processing system, which includes the following complementary plasma modules: two low-pressure unbalanced magnetrons; source of plasma and activated particles on the basis of RF inductive discharge; medium energy ion source based on discharge in crossed EH fields; system of pulsed polarization of samples. We investigated the characteristics of the individual plasma modules and the possibility of their joint operation during reactive ion-plasma coating synthesis. The multipurpose ion-plasma processing system allows in a single cycle to clean and activate the processed surface, deposit metal, dielectric, complex-composite and multilayer coatings with unique properties.

**Keywords:** reactive synthesis, complex-composite compounds, RF inductive discharge, magnetron, ion source.

**ВСТУП**

На сьогоднішній день актуальною є розробка технологій реактивного іонно-плазмового синтезу (РПС) металічних, діелектричних та напівпровідникових структур різного функціонального призначення для потреб мікрота наноелектроніки, біомедицини, ядерної енергетики і машинобудування [1—5]. Серед методів формування таких покриттів широко використовуються методи термічного та електронно-променевого нанесення шарів, а в окремих випадках — молекулярно-променева епітаксія. Ці методи мають свої переваги і недоліки, але характерною рисою для них є досить вузьке функціональне призначення для вирішення тієї чи іншої технологічної задачі.

Технології реактивного іонно-плазмового синтезу, що реалізується у багатофункціональній іонно-плазмовій технологічній системі, яку описано в цій роботі, вигідно відрізняються від вказаних вище технологій своєю універсальністю, оскільки можуть використовуватися як для контрольованого нанесення шарів різноманітного функціонального призначення, так і для їх контрольованої обробки, наприклад, травління, легування, тощо. Іонно-плазмова технологічна система поєднує унікальний набір іонно-плазмових інструментів обробки поверхні, що дає можливість отримання покриттів з параметрами, які на даний момент є недосяжними для існуючого серійного плазмово-технологічного обладнання. Технологія нанесення функціональних покриттів, зокрема, TiN, AlN, ZrN, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> базується на принципово новому підході до синтезу діелектричних оксидних та нітридних покриттів із використанням плазмової активації реакційного газу та іонного бомбардування синтезованих структур. Багатофункціональна іонно-плазмова технологічна система дозволяє, в залежності від потреб конкретних технологічних процесів, одночасно використовувати різні компліментарні плазмові модулі, як то:

- 1) Два незбалансованих магнетрони низького тиску [6, 7];
- 2) Джерело плазми та активованих частинок на базі ВЧ індукційного розряду [8, 9];

3) Джерело іонів середніх енергій на базі розряду в схрещених ЕН полях [10];

4) Система імпульсної поляризації зразків [11].

Синтез покриттів здійснюється в діапазоні низького тиску робочого газу (0,5—2 мТор), коли рух частинок відбувається майже без зіткнень у молекулярному режимі. По-перше, це дозволяє збільшити дистанцію магнетрон — поверхня, що оброблюється, до 30—40 см, значно збільшити площу поверхні нанесення та підвищити швидкість нанесення. По-друге, це дає змогу проводити активацію реактивного газу ВЧ індукційним розрядом та доставляти активовані частинки до області синтезу покриттів. По-третє, це відкриває можливість здійснювати бомбардування поверхні високо-, середньо-, або низькоенергетичними іонами для надання синтезованим покриттям унікальних фізичних властивостей.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ  
УСТАТКУВАННЯ**

Іонно-плазмова система для нанесення діелектричних покриттів на базі двох магнетронів постійного струму низького тиску та ВЧ індукційного (ВЧІ) розряду було зібрано на вакуумній технологічній установці типу УРМ3 (рис. 1)

Вакуумна камера, зроблена з неіржавіючої сталі, має форму циліндра діаметром 700 мм. Форвакуумний та дифузійний насоси відкачують камеру до залишкового вакууму  $1 \cdot 10^{-5}$  Тор.

До складу іонно-плазмової системи входять два магнетрони 3, 8 низького тиску [6, 7], розташовані на торці та на боковому фланці камери, перпендикулярно один одному, ВЧІ джерело плазми та активованих частинок реактивного газу 4, розташоване всередині камери, джерело іонів 10, розташоване на боковому фланці камери (рис. 1). Взаємне розташування всіх компонентів вибрано таким чином, щоб на оброблювану поверхню можливо було одночасно подавати потоки металів, активованих частинок реактивного газу та іонів інертного або реактивного газів.

Конструкцію планарного магнетрона на постійних магнітах ілюструє рис. 2.

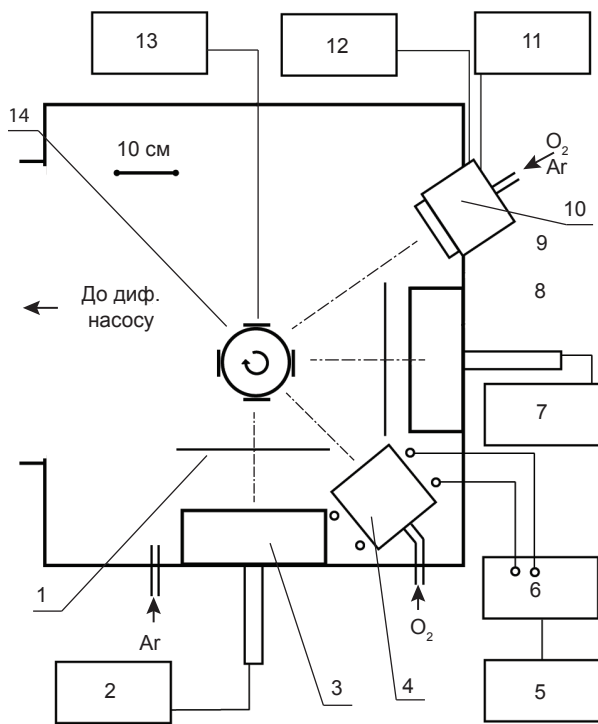


Рис. 1. Іонно-плазмова система для реактивного синтезу покриттів на базі двох магнетронів, джерела ВЧІ плазми та джерела іонів. 1, 9 — заслінка, 2, 7 — джерело живлення магнетрона, 3, 8 — магнетрон, 4 — джерело ВЧІ плазми, 5 — ВЧ генератор, 6 — узгоджувачий пристрій, 10 — джерело іонів, 11 — джерело живлення магнітного поля, 12 — джерело живлення постійного струму, 13 — імпульсне джерело живлення для поляризації зразків, 14 — система обертання зразків

Джерела живлення постійного струму 2, 7 підключаються до магнетронів через пасивну систему дугогасіння [12, 13]. Джерело живлення для магнетрона дозволяє отримувати напруги до 1 кВ і струм розряду до 20 А, максимальна потужність блоку живлення — 6 кВт.

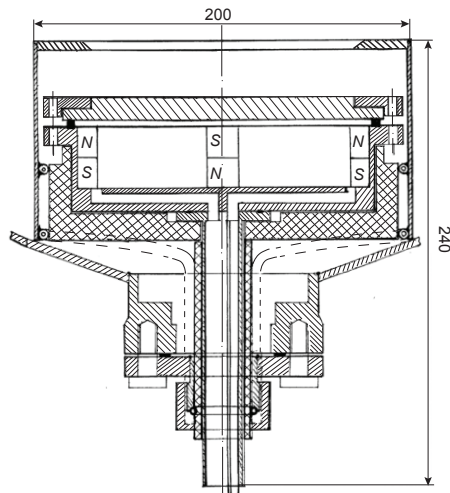


Рис. 2. Схема та фото магнетрона на постійних магнітах

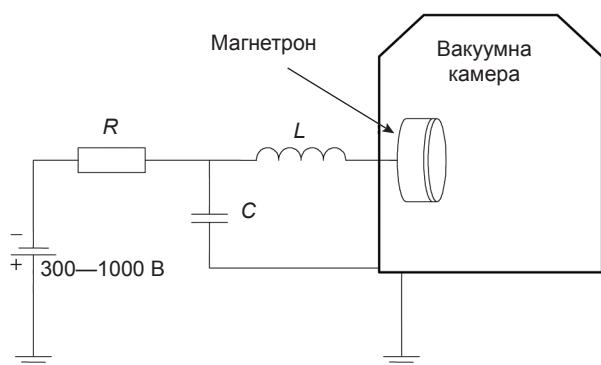


Мішені магнетронів діаметром 170 мм виконано з алюмінію, цирконію та титану. Відстань від мішені до зразків можна змінювати в межах 100—700 мм у випадку застосування одного магнетрону, і фіксовано у, приблизно, 300 мм для випадку застосування одночасно двох магнетронів та джерела іонів.

При роботі з реактивними газами магнетронний розряд є дуже нестабільним, на мішені магнетрона з'являються мікродуги, що ускладнює стабілізацію параметрів магнетронного розряду та призводить до появи крапель на оброблюваних виробках. Для того, щоб запобігти утворенню мікродуг та зв'язаних з ними шкідливим ефектам, кожен магнетрон було обладнано системою пасивного дугогасіння (рис. 3). З детальним описом принципу дії цієї системи можна ознайомитися в [12, 13].

Джерело ВЧІ плазми 4 слугує для створення потоку активованих частинок реактивного газу, а також потоку повільних іонів та електронів. Воно застосовується сумісно з магнетроном для нанесення оксидів та нітридів металів. Джерело ВЧІ плазми розташоване всередині вакуумної камери, що дозволяє вибирати оптимальне співвідношення між відстанями від магнетронів до зразків та від джерела плазми до зразків. Плазма в такому джерелі сконцентрована в індукційній камері, виконаній з керамічної труби (рис. 4). На виході джерела встановлено металеву сітку, що обмежує плазму і забезпечує перепад тиску між джерелом ВЧІ плазми та технологічною

камерою. Докладні дослідження джерела плазми та сумісну роботу магнетрона та джерела плазми описано в [6, 14].



$$R = 10 \text{ Ом}, L = 19 \text{ мкГн}, C = 1 \text{ мкФ}$$

Рис. 3. Схема пасивного захисту від утворення мікродуг

Для живлення джерела ВЧІ плазми використовується ВЧ генератор 5 частотою 13,56 МГц потужністю 1 кВт, який приєднується до котушки індуктивності за допомогою узгоджувачого пристрою 6.

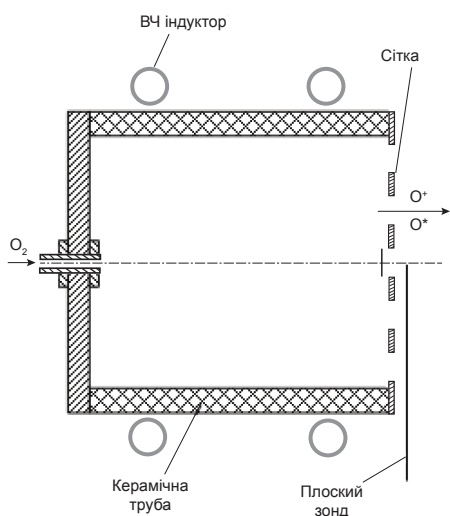


Рис. 4. Схема та фото джерела ВЧІ плазми

Джерело іонів зі схрещеними полями типу «Радикал» 10 застосовується для створення потоку іонів середніх енергій [10], котрий може бути застосовано для очищення зразків перед процесом нанесення покриттів та одночасно з магнетронним розрядом для керування властивостями отриманих плівок.

Конструкцію джерела іонів ілюструє рис. 5. 19 розрядних комірок багатоканального джерела, розміщені по гексагональній структурі з кроком 16 мм, формують складовий пучок іонів робочого газу діаметром 80 мм. Головними елементами конструкції джерела є анод 4 і катодний блок 2. Анод, виконаний у вигляді диска завдовжки 6 мм з отворами діаметром 5 мм, виготовлений з немагнітного матеріалу і кріпиться до катодного блоку за допомогою фторопластових ізоляторів 5. Підведення електроживлення до аноду та охолодження його водою здійснюється через вакуумні вводи в торці катодного блоку. Напряга на аноді змінювалася від 0 до 3 кВ.

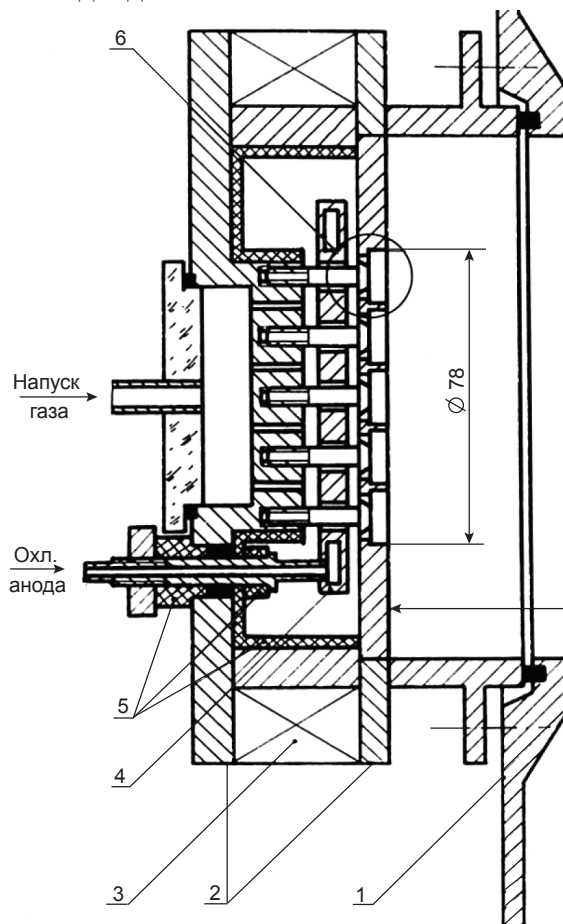


Рис. 5. Креслення 19-канального джерела іонів «Радикал М». 1 — вакуумна камера; 2 — катодний блок; 3 — соленоїд магнітного поля; 4 — охолоджуваний анод; 5 — ізолятори; 6 — розрядна комірка

Катодний блок багатоканального прискорювача виконує кілька функцій: є корпусом джерела, магнітопроводом і катодом розрядів у кожній комірці. У блоці були змонтовані електромагнітна система і система напуску робочого газу. При необхідності його можна було електрично ізолювати від вакуумної камери.

Електромагнітна система джерела складається з соленоїда магнітного поля 3 та магнітопроводів з магнітом'якої сталі. Електромагнітна система забезпечувала створення в кільцевому зазорі кожної комірки магнітне поле з радіальною складовою напруженості від 0 до 3 кЕ.

Напуск робочого газу (аргон, азот, кисень) в розрядні комірки здійснювався через симетричну систему отворів в катодному блоці. При цьому у вихідних каналах комірок з'являвся градієнт тиску робочого газу між джерелом і вакуумною камерою, величина якого залежала від провідності каналів і потоку газу.

При робочому тиску газу ( $p_{ii} = (1-5) \times 10^{-3}$  Тор) і напруженості магнітного поля  $H = 1-2$  кЕ в комірці рухливість електронів поперек магнітного поля різко обмежена. Після запалювання розряду в області схрещених електричного і магнітного полів в кільцевому зазорі між катодами-магнітопроводами формується шар негативного просторового заряду, в якому зосереджено основне падіння напруги на розряді. Сильне електричне поле, локалізоване в анодному шарі, здійснює роботу головним чином над іонами, утвореними в процесі іонізації атомів робочої речовини електронним ударом. Прискорені іони формують потік кільцевого перерізу, кут розльоту якого залежить від співвідношення аксіальної та радіальної складових електричного поля, а в кінцевому рахунку — від геометрії і взаємного розташування катодів комірки.

Магнітне поле в комірках джерела іонів створюється завдяки соленоїду, через який протікає постійний струм від блоку живлення 11. Для прискорення іонів на анод джерела подається напруга 1—3 кВ від блоку живлення постійного струму 12. Нанесення рівномірного шару плівок різних типів

покриття не тільки на пласку поверхню, але і на зразки складної форми, забезпечується за допомогою системи обертання зразків 14. Друга задача, яка вирішується за допомогою системи обертання, це нанесення багатошарових плівок. Як відомо, плівки, нанесені за один підхід та плівки тієї ж товщини, але нанесені з обертанням, різняться за своїми властивостями. Плівки, нанесені з обертанням, складаються з багатьох наночарів і мають унікальні властивості, не притаманні масивному зразку.

За допомогою імпульсного джерела живлення для поляризації зразків 13, на оброблювані деталі можна подавати імпульси різної шпаруватості [11], що дозволяє отримувати різні властивості покриттів.

Таким чином, у даному розділі описано загальну конструкцію іонно-плазмової системи, а також конструкції окремих її елементів. Наступні розділи присвячені докладному опису результатів експериментальних вимірів характеристик елементів іонно-плазмової системи.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОННОГО РОЗРЯДУ

За допомогою аналого-цифрового перетворювача, під'єданого до персонального комп'ютера, було виміряно вольт-амперні характеристики магнетронного розряду, а також залежності напруги і струму розряду та тиску в робочій камері від газопотоку реактивного газу. На базі цих даних в подальшому виконується вибір робочих параметрів процесу синтезу покриттів. Увімкнення індукційного розряду майже не змінює значення напруги та струму магнетронного розряду, але змінює значення повного тиску в робочій камері у випадку роботи з реактивними газами. Тому всі залежності було отримано при вимкненому індукційному розряді.

На рис. 6—8 наведено ВАХ магнетронного розряду в атмосфері чистого аргону для мішеней з різних металів — алюмінію, цирконію та титану. Як бачимо, для всіх матеріалів мішені, ВАХ розряду мають однакову форму, і різняться тільки нахилом. Як відомо, ВАХ магнетронного розряду залежать від матеріалу мішені, та величини

магнітного поля. При меншій товщині мішені магнітне поле на поверхні мішені збільшується, що призводить до зсуву ВАХ розряду у бік більших струмів та менших напруг. Той же ефект маємо і при ерозії мішені в процесі роботи.

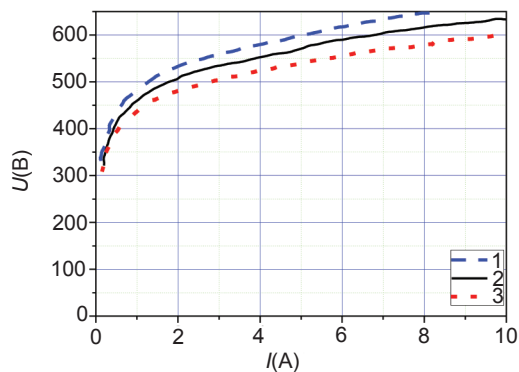


Рис. 6. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з алюмінієвою мішенню. Тиск аргону: 1 —  $p = 1 \cdot 10^{-3}$  Тор, 2 —  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, 3 —  $p = 2,5 \cdot 10^{-3}$  Тор

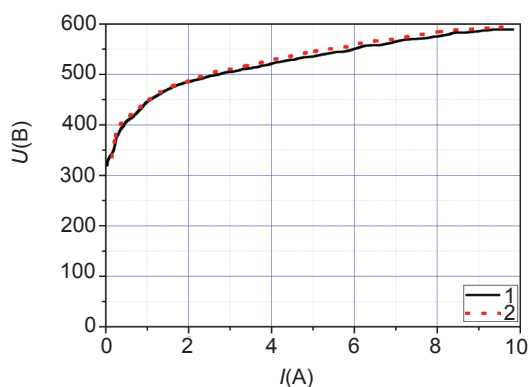


Рис. 7. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з титановою мішенню. Тиск аргону: 1 —  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, 2 —  $p = 2,5 \cdot 10^{-3}$  Тор

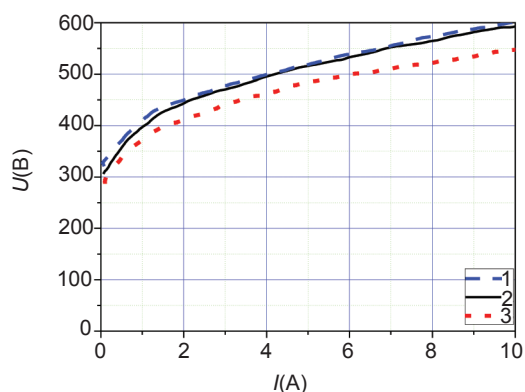


Рис. 8. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з цирконієвою мішенню. Тиск аргону: 1 —  $p = 8 \cdot 10^{-4}$  Тор, 2 —  $p = 1 \cdot 10^{-3}$  Тор, 3 —  $p = 3 \cdot 10^{-3}$  Тор

На рис. 9—14 показано ВАХ магнетронного розряду при напуску в камеру кисню

або азоту. Якщо для випадку розряду у чистому аргоні ВАХ для всіх матеріалів мішені були подібні, то у випадку роботи з реактивними газами поведінка ВАХ для мішеней з різних матеріалів різниться. Маємо дві групи подібних залежностей. У першу групу входять: мішені з алюмінію з реактивними газами киснем і азотом, та мішені з цирконію з реактивним газом киснем. На рис. 9 наведено ВАХ для алюмінієвої мішені в атмосфері суміші аргону та кисню. Бачимо, що є дві криві — верхня для чистого аргону, та нижня, майже стабілітрона, для режиму пасивації мішені при достатньо великому потоку кисню. Ці криві не мають гістерезису. Перехід між ними при середніх значеннях потоку кисню відбувається по S-образній кривій. Як бачимо, ці перехідні криві мають гістерезис. Похідна ВАХ в зоні негативного диференційного опору визначається найбільшим значенням з похідних ВАХ розряду та характеристики навантаження джерела живлення. Якщо «істинна» ВАХ розряду є більш пологою, ніж характеристика навантаження джерела живлення, спостерігається стрибкоподібний перехід до режиму пасивації та назад.

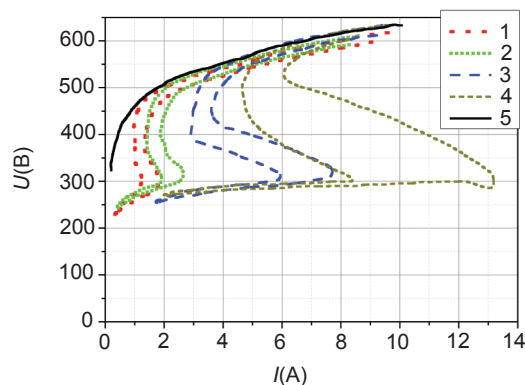


Рис. 9. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з киснем, мішені з алюмінію. Тиск аргону  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, газопотік кисню  $q$ : 1 —  $q = 5,5$  см³/хв; 2 —  $q = 7,5$  см³/хв; 3 —  $q = 13,5$  см³/хв; 4 —  $q = 21,5$  см³/хв; 5 —  $q = 0$  см³/хв

На рис. 10 наведено ВАХ магнетронного розряду для алюмінієвої мішені при напуску в робочу камеру азоту. Як бачимо з рисунків, криві з азотом подібні до кривих з киснем. На них присутня як S-образна частина кривої, так і явище гістерезису. Але петля S-образної кривої дещо менша, і ми маємо змогу пройти її всю.

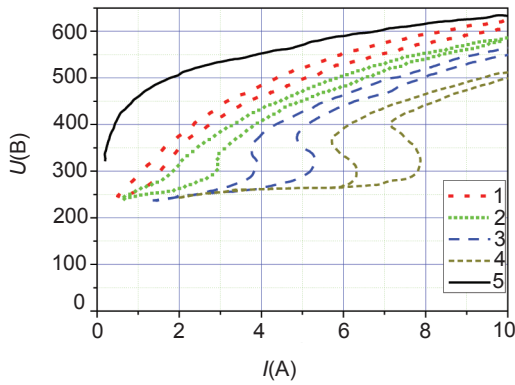


Рис. 10. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з азотом, мішень з алюмінію. Тиск аргону  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, газопотік азоту  $q$ : 1 —  $q = 7,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 2 —  $q = 10 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 3 —  $q = 13,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 4 —  $q = 17 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 5 —  $q = 0 \text{ см}^3/\text{хв}$

Для мішені з цирконію у випадку напуску кисню бачимо такий самий ефект, але менш ярко виражений (рис. 11). Нахил  $S$ -образної кривої менший і тому стало можливим пройти всю криву повністю. Також бачимо ефект гістерезису.

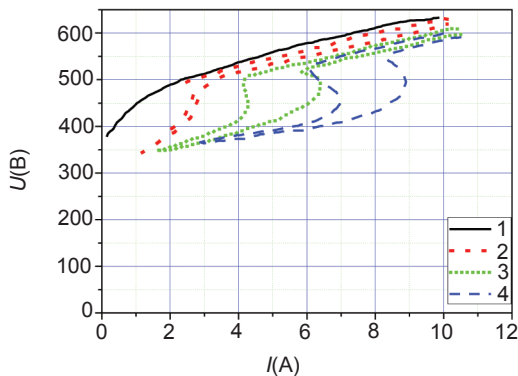


Рис. 11. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з киснем, мішень з цирконію. Тиск аргону  $p = 9 \cdot 10^{-4}$  Тор; газопотік кисню  $q$ : 1 —  $q = 0 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 2 —  $q = 21,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 3 —  $q = 25,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 4 —  $q = 30 \text{ см}^3/\text{хв}$

Як для алюмінію, так і для цирконію нам потрібно проводити процес нанесення оксидів в «металевій моді», тобто коли мішень далека від пасивації. Те ж саме стосується і процесу нанесення нітриду алюмінію.

Нам це необхідно, щоб уникнути мікродут та, як наслідок, мікрокраплин. Цим вимогам задовольняє верхня частина кривих, що лежить вище області гістерезису.

Іншу поведінку демонструють розряди з титановою мішенню та розряд з цирконієвою мішенню і реактивним газом азотом.

(рис. 12—14). Вони створюють другу групу. Як бачимо, ці ВАХ не мають  $S$ -образної форми. Також, на відміну від першої групи усі криві пересікають криву для чистого аргону — при великих потужностях криві для азоту, або кисню лежать нижче, а при малих, вище, ніж крива для чистого аргону.

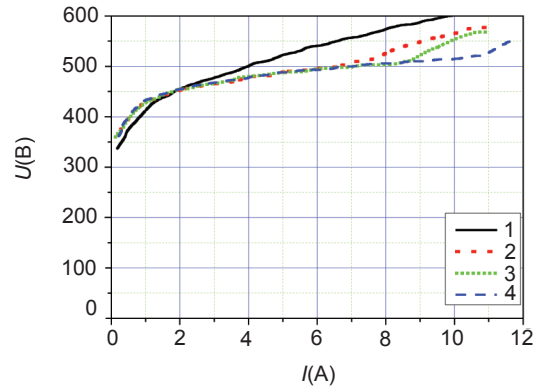


Рис. 12. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з азотом, мішень з цирконію. Тиск аргону  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, газопотік азоту  $q$ : 1 —  $q = 0 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 2 —  $q = 21,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 3 —  $q = 25,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 4 —  $q = 30 \text{ см}^3/\text{хв}$

Якщо для мішеней з цирконію та титану при напуску азоту криві плавні, то у випадку мішені з титану та реактивного газу кисню перехід між частинами кривої відбувається стрибком — при достатньо великій потужності розряду крива з киснем лежить нижче кривої для чистого аргону, потім при деякому значенні потужності стрибком відбувається перехід до другої частини кривої, що лежить над кривою для чистого аргону.

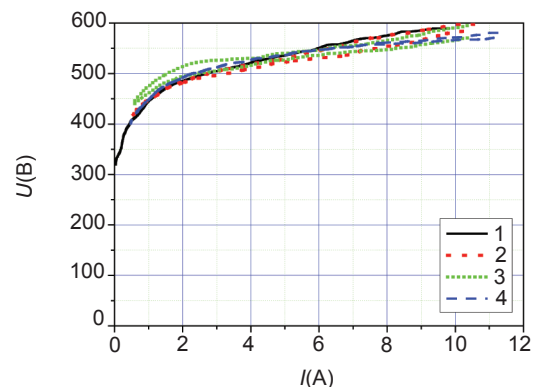


Рис. 13. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з азотом, мішень з титану. Тиск аргону  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, газопотік азоту  $q$ : 1 —  $q = 0 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 2 —  $q = 13,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 3 —  $q = 21,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ ; 4 —  $q = 30 \text{ см}^3/\text{хв}$

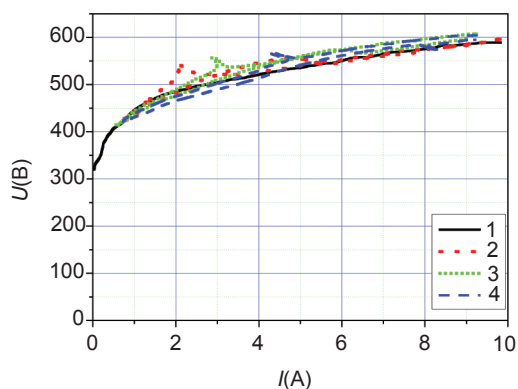


Рис. 14. ВАХ магнетронного розряду в аргоні з киснем, мішень з титану. Тиск аргону  $p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Тор, газопотік кисню  $q$ : 1 —  $q = 0$  см<sup>3</sup>/хв; 2 —  $q = 13,5$  см<sup>3</sup>/хв; 3 —  $q = 17$  см<sup>3</sup>/хв; 4 —  $q = 21,5$  см<sup>3</sup>/хв

### ХАРАКТЕРИСТИКИ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ «РАДИКАЛ М»

Призначенням джерела іонів середніх енергій (0,5—3 кеВ) у складі іонно-плазмової системи є очистка та активація поверхні зразків перед нанесенням складнокомпозиційних сполук, а також іонне асистування в процесі синтезу плівок. Керуючи енергією, щільністю струму та масовим складом пучка іонів можливо оперативно змінювати щільність, морфологію та стехіометрію синтезованих плівок. Для цього необхідно забезпечити сумісну роботу магнетронної розпилюючої системи та джерела іонів. По-перше, необхідно визначити діапазон тиску газу в робочій камері та значення газопотоків через МРС та джерело іонів; їх вплив на основні характеристики системи: вольт-амперні характеристики, їх залежність від магнітного поля та градієнту тиску між робочою камерою, магнетроном та джерелом іонів.

На рис. 15 представлені вольт-амперні характеристики джерела іонів «Радикал М» з 19 працюючими комірками. Діаметр пучка іонів приблизно 120 мм на відстані 200 мм, а напуск робочого газу аргон здійснюється через джерело. Струм пучка іонів на провідний колектор вимірювався на відстані 350 мм від джерела іонів. На рис. 16 приведені залежності струму розряду та струму на колектор від струму соленоїда магнітного поля.

Графіки, наведені на рис. 17, відповідають технологічному режиму нанесення плівок починаючи з мінімального тиску робочого

газу  $5 \cdot 10^{-4}$  Тор для роботи МРС. Як видно з рисунку, регулюючи величину напуску газу через джерело чи через МРС можливо керувати щільністю струму іонів в широкому діапазоні від 0,1 до 10 мА/см<sup>2</sup> при постійній середній енергії іонів.

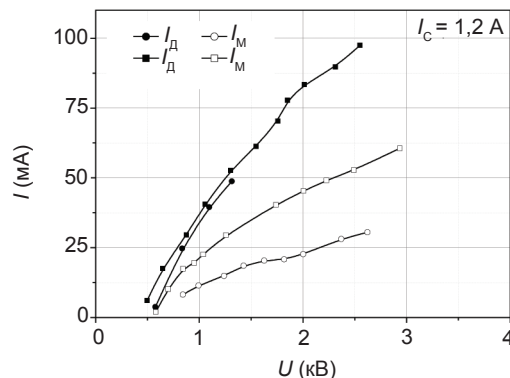


Рис. 15. Вольт-амперні характеристики джерела іонів «Радикал М». Струм розряду  $I_D$  та струм на колектор  $I_M$ . Тиск  $p = 2 \cdot 10^{-4}$  Тор — кола,  $p = 3 \cdot 10^{-4}$  Тор — квадрати. Струм котушки соленоїда магнітного поля — 1,2 А

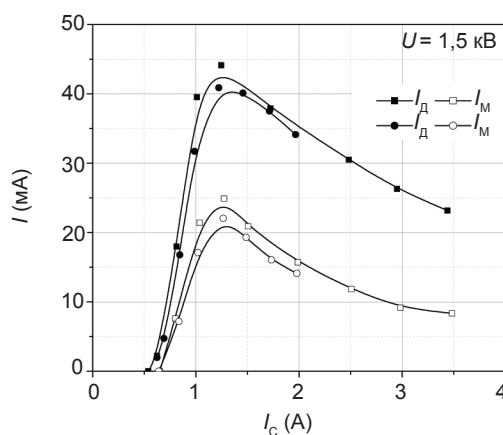


Рис. 16. Залежності струму розряду  $I_D$  та струму на колектор  $I_M$  від струму соленоїда магнітного поля. Тиск  $p = 2,2 \cdot 10^{-4}$  Тор — квадрати,  $p = 3 \cdot 10^{-4}$  Тор — кола

Важливим питанням при іонно-променевої обробці діелектричних покриттів є компенсація поверхневого заряду іонів. На рис. 18 наведено залежність плаваючого потенціалу колектора від тиску газу в робочій камері. Помітно, що потенціал складає значну величину 100—180 В, що приводить до появи мікродуг на поверхні камери та колектору. Зазвичай, ця проблема вирішується за допомогою додаткового катода-нейтралізатора [15], але в нашій системі було знайдено ще одну можливість, що не потребує додаткового обладнання.



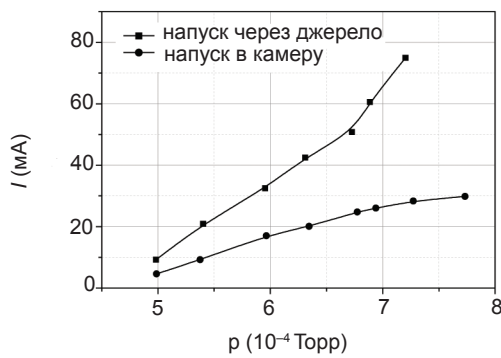


Рис. 17. Залежність струму розряду від тиску газу в робочій камері при напуску в камеру та у джерело іонів

При вмиканні магнетронного розряду, навіть при закритій заслінці і струмі магнетрона не більше 100 мА, потенціал колектора зменшується до 0 або негативної величини. Таким чином, магнетронний розряд є ефективним засобом компенсації іонного просторового та поверхневого заряду

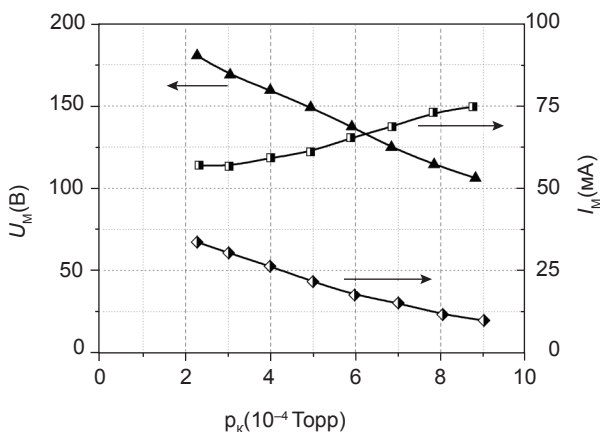


Рис. 18. Залежність плаваючого потенціалу колектора  $U_M$  та струму розряду (верхня крива) і колектора (нижня крива) від тиску газу в робочій камері

### СИСТЕМА ІМПУЛЬСНОЇ ПОЛЯРІЗАЦІЇ ЗРАЗКІВ

В технологіях осадження діелектричних покриттів важливу роль відіграє іонне бомбардування плівки, що зростає, але прискорення іонів в напрямку покриття прикладенням постійної негативної напруги до зразків у даному випадку не є ефективним внаслідок того, що покриття не проводять електричний струм. В останні десятиріччя застосування змінного струму різних частотних діапазонів стало основним плазмовим інструментом для реалізації таких технологій, причому зараз на перший план виходять такі прикладні

аспекти, як ККД, надійність, простота керування, вартість обладнання. З цієї точки зору ВЧ системи не є досконалими, а достойною альтернативою ВЧ розрядам є імпульсні розряди середньої (десятки-сотні кГц) частоти. Сучасна елементна база електроніки дозволяє створювати середньочастотні джерела коливань прямокутної форми, які придатні для роботи у широкому діапазоні потужностей. Такі джерела мають значно вищий ККД, значно нижчу вартість та значно простіше узгодження з плазмою та керування.

Практика вживання плазмових технологій показує, що джерела живлення для плазмових технологічних пристроїв повинні бути спеціально спроектовані для цих цілей. Крім звичайних параметрів — напруга, граничний струм, максимальна потужність, ККД, для живлення газорозрядних пристроїв важливі: форма характеристики навантаження, стійкість до дугоутворення, стійкість до коротких замикань, пробоїв і перевантажень. Часто від властивостей джерела живлення залежить успіх технологічної операції.

Тим більше це відноситься до імпульсних джерел живлення (ІДЖ). Вимоги імпульсної іонно-плазмової обробки пред'являють ряд специфічних вимог до конструкції ІДЖ.

- Щоб перекривати весь можливий спектр енергії бомбардуючих іонів вихідна напруга повинна регулюватися від десятків до тисяч Вольт.
- Шпаруватість імпульсів повинна регулюватися від майже 1 (постійний струм) до тисяч (дуже слабка імпульсна дія).
- Граничний струм імпульсу визначається площею підкладкотримача із зразками та густиною плазми. Для описаної вище системи струм з плазми не перевищував 1 А.
- Середня потужність не повинна перевищувати декількох десятків Ватів, оскільки більший енерговнесок в зразки, розташовані у вакуумі без примусового тепловідводу приведе до перегріву зразків. В той же час, бажано, щоб імпульсна потужність була не менше 1 кВт.
- Оскільки тонкі шари об'ємного заряду мають відносно велику електричну ємність, ІДЖ повинно допускати роботу

на значне ємнісне навантаження.

- ІДЖ повинно бути стійким до дугоутворення.
- В конструкції ІДЖ повинен бути передбачений захист від короткого замикання.
- Необхідно передбачити обмеження граничного струму. При цьому формування лінійно падаючої характеристики навантаження за допомогою баластних резисторів або магнітних шунтів небажане через громіздкість і низький ККД. Характеристика навантаження повинна мати форму, близьку до прямокутної.

Задовольнити всьому комплексу перерахованих вимог дозволило ІДЖ, розроблене на основі двотактної трансформаторної схеми з МОП транзисторами. Випробування розробленого ІДЖ показали, що ця схема цілком працездатна і може бути використана для експериментів по нанесенню покриттів з імпульсним зсувом на підкладку.

Електричні характеристики варіанту ІДЖ були такі:

Діапазон вихідних напруг.....	0—2000 В
Максимальний вихідний струм.....	2 А
Тривалість імпульсів.....	1 мкс — $t_{\max}$ (див. рис. 20)
Частота повторення.....	0—200 кГц
Шпаруватість.....	1,1 — $\infty$
Імпульсна потужність.....	до 4 кВт
Середня потужність.....	до 200 Вт
Діапазон регулювання обмеження струму.....	0,5—2 А
Захист від короткого замикання в навантаженні.....	є
Захист від дугоутворення.....	є

Форма напруги і струму імпульсу, створюваного ІДЖ показана на рис. 19, а гранична тривалість імпульсу  $t_{\max}$  залежно від амплітуди імпульсу — на рис. 20. Крива навантаження при максимальних значеннях амплітуди імпульсу і граничного струму ІДЖ показана на рис. 21.

Розроблене ІДЖ було застосоване для поляризації зразків в процесах синтезу як оксидних, так і нітридних покриттів. Негативна напруга зсуву на зразок подавалася з метою активації реакції синтезу потоком

прискорених іонів з плазми. Цей же потік сприяв оперативному очищенню поверхні безпосередньо в ході нанесення і видаленню неміцних фаз конденсату, тим самим покращуючи якість (стехіометрію, адгезію, чистоту і щільність) плівки.

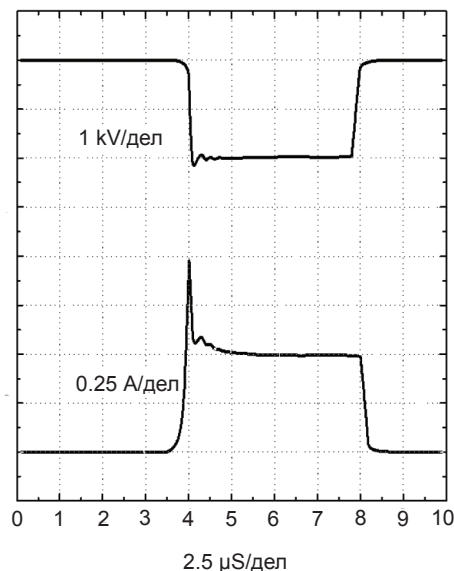


Рис. 19. Форма напруги (вгорі) і струму імпульсу, створюваного двохопуперіодною схемою

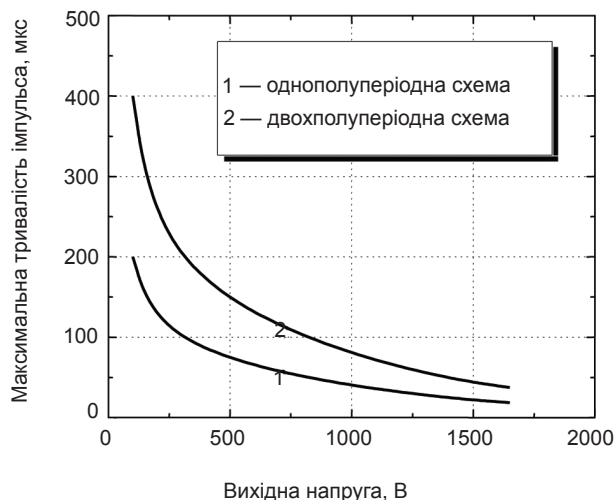


Рис. 20. Залежність граничної тривалості імпульсу від його амплітуди

При використанні для цих цілей постійної напруги зсуву можливості управління цим потоком обмежені, оскільки напруга диктується необхідною енергією активації. Збільшення напруги зрушує баланс зростання у бік розпилювання плівки, тобто зменшує швидкість нанесення, а також підвищує температуру зразків. Якщо ми маємо справу з нанесенням діелектричних плівок, постійна напруга зовсім непридатна.

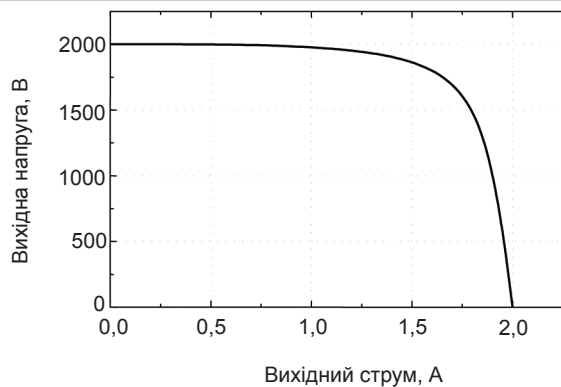


Рис. 21. Динамічна крива навантаження ІДЖ

Оскільки тривалість і період повторення імпульсів в експериментах значно менші часу утворення одного моношару, на кожен моношар доводиться багато імпульсів, і виявляється тільки інтегральний ефект від багатьох імпульсів, тобто процес можна вважати квазістаціонарним. При цьому тривалість імпульсів і частота їх повторення принципового значення не мають, а з часових характеристик імпульсів основну роль грає шпаруватість, що управляє середнім за часом потоком іонів. Тривалість імпульсів при нанесенні, як і при очищенні істотної ролі не грає і визначається, головним чином, оптимальним режимом джерела живлення і відсутністю дугоутворення. Отже, є тільки два незалежні параметри імпульсів: напруга і шпаруватість (струм визначається параметрами плазми в магнетроні).

## ВИСНОВКИ

Результатом роботи стало створення багатофункціональної іонно-плазмової технологічної системи, до складу якої входять наступні компліментарні плазмові модулі:

1. Два незбалансованих магнетрони низького тиску;
2. ВЧ індукційне джерело плазми та активованих частинок;
3. Джерело іонів середніх енергій на базі розряду в схрещених ЕН полях;
4. Система імпульсної поляризації зразків.

Було досліджено характеристики окремих плазмових модулів та показано можливість їх сумісної дії в процесах реактивного іонно-плазмового синтезу функціональних покриттів та структур, зокрема TiN, AlN, ZrN, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>.

Робочий діапазон параметрів багатофункціональної іонно-плазмової технологічної системи дозволяє в єдиному циклі проводити очистку та активацію поверхні, що обробляється, наносити металеві, діелектричні складнокомпозиційні та багатошарові покриття з унікальними властивостями.

Роботу виконано в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та Науковому фізико-технологічному центрі МОН та НАН України в результаті виконання проектів Міністерства освіти і науки України (Номери держреєстрації: 0113U001080, 0112U000362, 0112U006974).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ian G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources: Second, Revised and Extended Edition*, Wiley-VCH. — New York. — 2004.
2. Rius G., Llobet J., Esplandiú M. J., Sole L., Borrise X., Perez-Murano F., *Microelectronic Engineering*. — 2009. — Vol. 86. — 892 p.
3. Harold R. Kaufman, *J. Vac. Sci. Technol. A*. — 1985. — Vol. 4. — 764 p.
4. Кузмичев А. И. Введение в физику и технику магнетронного распыления. — К. Аверс, 2008. — 244 с.
5. Sail I. Recent aspects concerning DC reactive magnetron sputtering of thin films: a review // *Surf. Coat. Technol.* — 2000. — Vol. 127. — P. 203—219.
6. Walkowicz J., Zykov A., Dudin S., Yakovin S., Brudnias R. ICP enhanced reactive magnetron sputtering system for synthesis of alumina coating // *Tribologia*. — 2006. — No. 6. — P. 163—174.
7. Walkowicz J., Zykov A. V., Dudin S. V., Yakovin S. D. Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. — 2007. — No. 1. — P. 194—196.
8. Denysenko I., Yu M., Dudin S., Zykov A., Azarenkov N. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources // *Phys. Plasmas*. — 2002. — Vol. 9, No. 11.
9. Dudin S. V., Zykov A. V., Dahov A. N., Farenik V. I. Experimental research of icp reactor for plasma-chemical etching // *Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics* (12). — 2006. — No. 6. — P. 189 — 191.
10. Маишев Ю. П. Источники ионов для реактивного ионно-лучевого травления и нанесения пленок. // *Электронная промышленность*. — 1990. — № 5. — 15 с.

11. Walkowicz J., Miernik K., Dudin S., Farenik V. Pulsed-plasma assisted magnetron methods odepositing TiN coating Surface and coating technology. — 2000. — Vol. 125. — P. 341—346.
12. Borodin M. I., Dudin S. V., Farenik V. I. Time resolved investigation of non-stationary magnetron discharge // 10th Intl. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, Ukraine, September 13—18, 2004 / Book of Abstracts, 2004. — 181 p.
13. Dudin S. V., Farenik V. I., Dahov A. N. Development of arc suppression technique for reactive magnetron sputtering. Physical Surface Engineering. — 2005. — Vol. 3. — No. 3—4.
14. Зиков О. В., Яковін С. Д., Дудін С. В. Синтез діелектричних сполук на базі магнетрону постійного струму // Фізическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 3. — С. 195—203.
15. Дудин С. В., Зыков А. В. Влияние термоэлектронной эмиссии на компенсацию объемного заряда широкого пучка ионов низкой энергии. // Письма в ЖТФ. — 1994. — Т. 20, вып. 11. — С. 58—63.
7. Walkowicz J., Zykov A. V., Dudin S. V., Yakovin S. D. Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. — 2007. — No. 1. — P. 194—196.
8. Denysenko I., Yu M., Dudin S., Zykov A., Azarenkov N. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources // Phys. Plasmas. — 2002. — Vol. 9, No. 11.
9. Dudin S. V., Zykov A. V., Dahov A. N., Farenik V. I. Experimental research of icp reactor for plasma-chemical etching // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics (12). — 2006. — No. 6. — P. 189—191.
10. Maishev Yu. P. Istochniki ionov dlya reaktivnogo ionno-luchevogo travleniya i naneseniya plenok. // Elektronnaya promyshlennost'. — 1990. — No. 5. — 15 p.
11. Walkowicz J., Miernik K., Dudin S., Farenik V. Pulsed-plasma assisted magnetron methods odepositing TiN coating Surface and coating technology. — 2000. — Vol. 125. — P. 341—346.
12. Borodin M. I., Dudin S. V., Farenik V. I. Time resolved investigation of non-stationary magnetron discharge // 10th Intl. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, Ukraine, September 13—18, 2004 / Book of Abstracts, 2004. — 181 p.
13. Dudin S. V., Farenik V. I., Dahov A. N. Development of arc suppression technique for reactive magnetron sputtering. Physical Surface Engineering. — 2005. — Vol. 3. — No. 3—4.
14. Zikov O. V., Yakovin S. D., Dudin S. V. Sintez dielektrichnih spoluk na bazi magnetronu postijnogo strumu // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2009. — Vol. 7, No. 3. — P. 195—203.
15. Dudin S. V., Zykov A. V. Vliyanie termoelektronnoj emissii na kompensaciyu obemnogo zaryada shirokogo puchka ionov nizkoj energii. // Pis'ma v ZhTF. — 1994. — Vol. 20, vyp. 11. — P. 58—63.

## LITERATURA

1. Ian G. Brown, The Physics and Technology of Ion Sources: Second, Revised and Extended Edition, Wiley-VCH. — New York. — 2004.
2. Rius G., Llobet J., Esplandiú M. J., Sole L., Borrise X., Perez-Murano F., Microelectronic Engineering. — 2009. — Vol. 86. — 892 p.
3. Harold R. Kaufman, J. Vac. Sci. Technol. A. — 1985. — Vol. 4. — 764 p.
4. Kuzmichev A. I. Vvedenie v fiziku i tehniku magnetronnogo raspyleniya. — K. Avers, 2008. — 244 p.
5. Sail I. Recent aspects concerning DC reactive magnetron sputtering of thin films: a review // Surf. Coat. Technol. — 2000. — Vol. 127. — P. 203—219.
6. Walkowicz J., Zykov A., Dudin S., Yakovin S., Brudnias R. ICP enhanced reactive magnetron sputtering system for syntesis of alumina coating // Tribologia. — 2006. — No. 6. — P. 163—174.
13. Dudin S. V., Farenik V. I., Dahov A. N. Development of arc suppression technique for reactive magnetron sputtering. Physical Surface Engineering. — 2005. — Vol. 3. — No. 3—4.
14. Zikov O. V., Yakovin S. D., Dudin S. V. Sintez dielektrichnih spoluk na bazi magnetronu postijnogo strumu // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2009. — Vol. 7, No. 3. — P. 195—203.
15. Dudin S. V., Zykov A. V. Vliyanie termoelektronnoj emissii na kompensaciyu obemnogo zaryada shirokogo puchka ionov nizkoj energii. // Pis'ma v ZhTF. — 1994. — Vol. 20, vyp. 11. — P. 58—63.