

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н.Каразіна

ЗИКОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 537.521.7

ГЕНЕРАЦІЯ І ТРАНСПОРТУВАННЯ ІОННИХ ПОТОКІВ В  
ПЛАЗМОВИХ СИСТЕМАХ З КОМБІНОВАНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ І  
МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків - 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В.Н.Каразіна Міністерства освіти і науки України і в Науковому фізико-технологічному центрі Міністерства освіти і науки України і Національної Академії Наук України.

Науковий консультант: академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор **Азаренков Микола Олексійович**, проректор з науково-педагогічної роботи Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна;

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор **Гаркуша Ігор Євгенійович**, директор Інституту фізики плазми, ННЦ ХФТІ НАНУ;

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Жовтянський Віктор Андрійович**, завідувач відділу плазмових технологій Інституту газу НАН України;

доктор фізико-математичних наук, професор **Погребняк Олександр Дмитрович**, завідувач кафедри наноелектроніки Сумського державного університету.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р. о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. ак. Курчатова, 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитися в Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України за адресою: 61077, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої  
ради Д64.051.12



Письменецький С.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Іонно-плазмові технології (ІПТ) є одним із найбільш важливих прикладних застосувань фізики газового розряду та низькотемпературної плазми. За допомогою методів ІПТ можуть бути створені принципово нові та вдосконалені існуючі технологічні процеси зміцнення поверхневих шарів матеріалів, очищення, активації та полірування поверхні, нанесення складнокомпозиційних функціональних покриттів, прецизійного травлення у виробництві приладів мікро- і наноелектроніки.

Одним із перспективних напрямів ІПТ є методи, засновані на комбінованій дії на поверхню потоків іонів низьких (менше 100 еВ), середніх (0,5 – 1 кеВ) і високих (більше 1 кеВ) енергій, хімічно активних частинок (ХАЧ) і розпоршених атомів. Це методи реактивного іонно-плазмового, іонно-променевого травлення (РІПТ) і реактивного іонно-плазмового синтезу (РІПС). Для керування електрофізичними, оптичними, механічними та іншими властивостями плівок, синтезованих методом РІПС, можна впливати на структуру та стехіометрію покриттів; як за допомогою зміни параметрів стану підкладки, так і вибираючи енергію, величину і склад потоку частинок, які конденсуються на поверхні осадження. У процесі РІПС функціональних покриттів величина енергій на один атом, який конденсується, може складати сотні електрон-вольт, що дає можливість синтезувати сполуки з унікальними властивостями, принципово недосяжними іншими методами. У технології мікро- і наноелектроніки методи РІПТ і РІЛТ дають можливість отримувати топологічний рисунок на тонкопліткових покриттях з розмірами елементів менш 0,1 мкм.

Реалізація методів РІПТ і РІПС здійснюється в іонно-плазмових системах (ІПС) – комплексі взаємозв'язаних функціональних елементів (газорозрядної камери з системою електродів, магнітної системи, вакуумної системи, системи електроживлення, системи контролю і управління) та іонно-плазмового модуля, до параметрів якого пред'являють наступні вимоги:

- можливість незалежного керування потоками іонів, ХАЧ і атомів, що конденсуються, в широкому діапазоні густини струму (0,1–100 мА/см<sup>2</sup>) і енергії (0,1 – 3 кеВ);
- висока однорідність потоків частинок на великій площині;
- зарядова і струмова компенсація потоків заряджених частинок;
- можливість тривалої роботи з хімічно активними газами;
- висока енергетична і газова економічність, великий ресурс роботи, простота і надійність конструкції, можливість автоматизувати управління;
- низький робочий тиск (менше 1 мТорр).

Низький тиск робочого газу забезпечує молекулярний, без зіткнень, режим руху активних частинок, при якому можна збільшувати розмір простору транспортування між джерелом частинок і оброблюваною поверхнею до 30 – 40 см і, відповідно, площі робочої поверхні, незалежно керувати потоками іонів ХАЧ і розпоршених атомів.

За сукупністю параметрів цим вимогам задовольняють газорозрядні іонно-плазмові системи з комбінованими електричними  $E$  і магнітними  $H$  полями. Саме магнітне поле дає можливість знизити робочий тиск, локалізувати область генерації активних частинок і формувати в комбінації з електричними полями направлені потоки частинок. Разом із тим забезпечити необхідний діапазон параметрів активних частинок для методів РПТ і РПС в одному типі ПС не вдається, і необхідна розробка незалежних плазмових модулів, заснованих на різних комбінаціях  $EH$  полів і сумісних по робочих параметрах. Забезпечити науково обґрунтовану розробку і розвиток ПС із заданими параметрами можливо тільки на основі фундаментальних досліджень.

Представлена дисертаційна робота присвячена комплексним експериментальним і теоретичним дослідженням процесів генерації та транспортування іонних потоків у газорозрядних плазмових системах різного типу з комбінованими електричними і магнітними полями, а саме: у планарному магнетронному розряді (ПМР) в прискорювальному і плазмовому режимах, ВЧ-індукційному (ВЧІ) розряді, а також у комбінованих ВЧ індукційно-ємнісному (ВЧІЄ) і ВЧ індукційно-магнетронному (ВЧІМ) розрядах. Вивчення і визначення загальних закономірностей формування іонних потоків (ІП) у цих системах становить інтерес не тільки для фундаментальної фізики газового розряду і низькотемпературної плазми в магнітному полі, а є актуальним для розробки нової генерації іонно-плазмового обладнання для мікро- і нанотехнологій.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження, результати яких представлені в дисертаційній роботі, проводилися в ході виконання держбюджетних фундаментальних і прикладних науково-дослідних робіт (НДР) Міністерства освіти і науки України. До 1993 р. НДР виконувалися на кафедрі фізики плазми фізико-технічного факультету Харківського державного університету, в період 1993-2013 рр. на кафедрі фізичних технологій Інституту високих технологій Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, а з 2013 р. на кафедрі матеріалів реакторобудування і фізичних технологій фізико-технічного факультету Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна.

- 1985-1990 рр. НДР «Розробка комплексу установок іонно-плазмового травлення навіпровідникових матеріалів діаметром до 100 мм, що використовуються при виробництві фотоприймачів та фотоприймальних пристроїв», шифр «Альтаір-Тополь».
- 1992-1993 рр. НДР «Дослідження умов формування електричних розрядів у комбінованих полях та процесів взаємодії плазми складної молекулярної структури з поверхнями твердих тіл» № ДР UA010086188.
- 1994-1995 рр. НДР «Дослідження іонно-пучкової плазми, прикатодних та прианодних шарів просторового заряду у комбінованих (постійному і високочастотному) електричному та магнітному полях у процесах травлення та нанесення тонких плівок різних матеріалів» № ДР 0194U018581.

- 1997-1999 рр. НДР «Дослідження процесів формування потоків заряджених частинок в іонно-плазмових системах з комбінованими ЕН полями» № ДР 0197U016507.
- 2000-2002 рр. НДР «Дослідження умов формування потоків заряджених частинок низьких та середніх енергій, методів керування їх параметрами та взаємодії синтезованих потоків з поверхнями твердих тіл № ДР 0100U003301.
- 2003-2005 рр. НДР «Дослідження процесів генерації та методів керування комбінованими потоками заряджених та нейтральних частинок у іонно-плазмових системах низького тиску» № ДР 0103U004209.
- 2006-2008 рр. НДР «Дослідження процесів формування потоків активних частинок у кластерних плазмових системах для синтезу та обробки наноструктур № ДР 0106Г001574.
- 2009-2010 рр. НДР «Технологічна апробація кластерної іонно-плазмової системи» № ДР 0109U001323.
- 2011-2012 рр. НДР «Реактивний іонно-плазмовий синтез функціональних нанокompatитних покриттів в кластерній плазмово-технологічній системі» № ДР 0111U001463.
- 2013-2014гг. НДР «Розробка технологій формування наноструктурованих покриттів на основі оксидів і нітридів металів перехідної групи» № ДР 0113U001080.

Також для виконання Державної програми розвитку промисловості на 2003-2011 рр. в частині виконання завдань по розвитку найбільш конкурентоспроможних напрямів мікроелектроніки в Україні на замовлення Міністерства промислової політики України на КФТ ХНУ були проведені наступні науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НДКР), окремі результати яких представлені в дисертаційній роботі:

- 2003-2006 рр. НДКР «Дослідження та створення комплексу реакторних модулів для проведення основних технологічних процесів вакуумно-плазмового травління при виробництві сучасних виробів мікроелектроніки та інтегральних схем» № ДР 0102U005322.
- 2007-2010 рр. НДКР «Розробка універсального джерела іонів для малоенергоємного іонно-радикального травління матеріалів мікроелектроніки на базі комбінованого індукційно-ємнісного ВЧ розряду» № ДР 0107U010814.

У 2002-2007 рр. в рамках міжнародної програми COST-532 «Трібологія і тріботехнологія» і згідно Договору про науково-технічне співробітництво між ХНУ і Інститутом технології експлуатації (м. Радом, Польща) на КФТ ФТФ була виконана сумісна НДКР «Розробка і створення обладнання і технологій для синтезу покриттів на основі оксиду алюмінію», окремі результати якої увійшли до дисертаційної роботи.

Частину результатів, що увійшли до дисертаційної роботи, було отримано в процесі проведення спільних фундаментальних і прикладних НДР в Науковому фізико-технологічному центрі МОН і НАН України:

- 1997-1999 рр. НДР «Дослідження умов формування електричних розрядів в комбінованих полях та процесів взаємодії плазми з поверхнею твердого тіла» № ДР 0197U004860.
- 2000-2001 рр. НДР «Дослідження процесів перенесення активованих частинок у низькотемпературній плазмі електричних розрядів у комбінованих полях» № ДР 0100U004406.
- 2004-2006 рр. НДР «Дослідження динаміки іонно-променевих та ВЧ розрядних плазмових систем у комбінованих електричному та магнітному полях» № ДР 0104U003157.

В усіх перелічених вище НДР і НДКР здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є визначення і узагальнення фізичних закономірностей процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах із комбінованими ЕН полями на основі фундаментальних положень фізики газового розряду та низькотемпературної плазми.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні **основні завдання:**

- Визначити умови і фізичний механізм виникнення (криві запалювання, згасання і пробою) газового розряду постійного струму від тиску робочого газу, величини і топології електричного і магнітного полів, граничних умов, визначити параметри подібності.
- Визначити закономірності інтегральних стаціонарних характеристик планарного розряду в магнітному полі в прискорювальному і плазмовому режимах і процесах генерації потоків заряджених частинок.
- Визначити умови переходу планарного магнетронного розряду з прискорювального в плазмовий режим і дослідити в дрейфовому наближенні фізичний механізм виникнення розряду з урахуванням існування груп електронів з різними функціями розподілу за енергією (ФРЕ).
- Визначити, як залежать умови існування розрядів від тиску робочого газу в плазмових системах з об'ємною іонізацією на базі магнетронного і ВЧ індукційного розрядів і фактори, що впливають на просторову однорідність і енергію потоку іонів.
- Визначити оптимальні параметри комбінованих ВЧ індукційно-ємнісного і індукційно-магнетронного розрядів для енергетично ефективної іонізації робочого газу і формування іонних потоків з різною енергією. Вивчити взаємовплив ВЧ індукційного, ВЧ ємнісного і магнетронного розрядів.
- Знайти закономірності процесів транспортування, зарядової і струмової компенсації широкоапертурних іонних потоків і формування параметрів іонно-пучкової плазми для джерел іонів на базі плазмових систем із різними комбінаціями ЕН полів.
- Шляхом порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками, визначити загальні закономірності і відмінні особливості

процесів генерації і транспортування іонних потоків у плазмових системах із різними комбінаціями ЕН полів.

**Об'єкт досліджень:** плазмові системи з комбінованими електричними (постійним, високочастотним, потенційним, вихровим) і магнітними (постійним, змінним) полями на базі планарного магнетронного розряду в прискорювальному і плазмовому режимах, ВЧ-індукційного розряду, комбінованих індукційно-ємнісного і індукційно-магнетронного розрядів.

**Предмет досліджень:** процеси генерації, транспортування, зарядової та струмової компенсації стаціонарних іонних потоків, умови виникнення і згасання розрядів, інтегральні та локальні характеристики розрядів у комбінованих ЕН полях.

**Методи досліджень.** Експериментальне вимірювання інтегральних характеристик розрядів: напруги запалювання, пробою і згасання залежно від тиску робочого газу, топології та напруженості магнітного поля, вольт-амперних і ватт-амперних характеристик. Вимірювання локальних параметрів плазми і потоків заряджених частинок зондовими методами: циліндричним одиночним і подвійним зондами Ленгмюра - енергетичних спектрів, температури і густини електронів і іонів, багатосітковим аналізатором – енергетичних спектрів іонів, одиночним плоским зондом у режимі насичення іонного струму – просторових розподілів густини іонного струму.

Розробка феноменологічних моделей рівноважної максвеллової, електронно-пучкової та іонно-пучкової плазми, прианодних і прикатодних шарів просторового заряду в схрещених полях ЕН і теоретичні розрахунки параметрів потоків заряджених частинок у дрейфовому наближенні та порівняльний аналіз експериментальних даних і теорії.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі вперше здобуто наступні результати:

- Вперше експериментально і теоретично встановлено, що виникнення газового розряду в магнітному полі залежно від величини і топології електричного і магнітного полів має два різні механізми:
  - стрибковоподібний *пробій* при сильному однорідному електричному полі внаслідок розвитку електронних лавин;
  - плавне, монотонне *запалювання* в слабкому чи неоднорідному електричному полі високоенергетичними електронами, захопленими в електромагнітну пастку.
 Вперше здобуто аналітичні вирази для енергетичної ціни іона і коефіцієнту іонізації для ансамблю електронів з різною функцією розподілу за енергіями і розраховано криві запалювання і пробою трьох типів.
- Вперше розроблено дрейфову теорію самоузгоджених станів системи передшар - прианодний електронний шар за різних умов на катодній межі (провідник, вакуум, іонно-пучкова плазма, плазма з інтенсивною іонізацією, термокатод) і показано їх визначальний вплив на інтегральні характеристики планарного магнетронного розряду в прискорювальному режимі.
- Вперше експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано принципову роль первинних високоенергетичних електронів, які осцилюють

в електромагнітній пастці, на запалювання і вольт-амперні характеристики ПМР в плазмовому режимі.

- Вперше експериментально доведено визначальну роль параметра подібності  $pd_i$ , де  $p$  – тиск робочого газу,  $d_i$  – характерний розмір іонізаційної пастки, на згасання розрядів з об'ємною іонізацією – ВЧ індукційного і планарного магнетронного розрядів, - при зниженні тиску робочого газу і визначено його порогову величину.
- Вперше експериментально і теоретично доведено зміну рівноважної температури плазмових електронів у ПМР внаслідок існування групи високоенергетичних електронів, густина яких залежить від питомої потужності в розряді. Ця залежність визначає ВАХ розряду при низькому тиску робочого газу.
- Вперше експериментально визначено верхню по тиску робочого газу  $p$  границю застосовності просторово усередненої моделі ВЧ індукційного розряду  $pd_i < 20$  мТорр·см і теоретично показано, що існування просторової неоднорідності густини струму іонів у плазмі ВЧ індукційного розряду при  $pd_i > 20$  мТорр·см обумовлено зменшенням довжини релаксації енергії електронів і збільшенням градієнта електронної температури.
- Вперше експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано принципову роль асиметрії електродів у енергобалансі ВЧ індукційно-емнісного розряду, її вплив на сумарну енергетичну ціну іона і енергетичну ефективність плазмових реакторів і джерел іонів, визначені енергетично оптимальні співвідношення площ електродів залежно від енергії іонів.
- Вперше розроблено феноменологічну модель енергетичного балансу в комбінованому індукційно-магнетронному розряді і теоретично пояснено існування високовольтного і сильнострумове режимів залежно від тиску робочого газу і потужності, що вкладається.
- Вперше встановлені загальні закономірності і відмінності процесу газової автокомпенсації та зовнішньої нейтралізації заряду потоків іонів, що генеруються різними типами джерел (прискорювача з анодним шаром, плазмових джерел іонів з односітковою і двосітковою прискорювальною системою) і доведено визначальну роль вторинної іон-електронної емісії з поверхні у формуванні параметрів іонно-пучкової плазми при автокомпенсації.
- Вперше проведено систематизацію процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах із комбінованими ЕН полями на основі дрейфової теорії, визначені загальні параметри подібності та закономірності ІПС на основі фундаментальних положень фізики газового розряду, низькотемпературної плазми і законів збереження частинок, імпульсу і енергії.

**Практичне значення отриманих результатів.** Представлені в дисертаційній роботі фундаментальні дослідження плазмових систем з комбінованими ЕН полями проводилися паралельно з виконанням прикладних НДР і НДКР із розробки іонно-плазмового обладнання для обробки поверхні.



Основну частину експериментальних досліджень проведено на серійному плазмовому обладнанні (джерело іонів «Радикал») або в пристроях з параметрами (геометричні розміри, величина щільності і енергії потоку іонів, робочі гази), характерними для проведення реальних іонно-плазмових технологічних процесів травління і модифікації поверхні, нанесення і синтезу тонких плівок. Тому результати фізичних досліджень безпосередньо застосовувалися на практиці та дали можливість розробити низку оригінальних технічних рішень для оптимізації джерела низькоенергетичних іонів і способів обробки діелектричних поверхонь, які було захищено патентами України і подано в Додатку А.

Рекомендації, здобуті у дисертаційній роботі, були використані та частково впроваджені у виробництво в ПО «Сатурн», м. Київ, Україна, ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна, НТК «Інститут монокристалів», м. Харків, Україна, Інститут технології і експлуатації, м. Радом, Польща, а також на теперішній час використовуються в навчальному процесі ХНУ імені В.Н. Каразіна.

Також ці технічні рішення лягли в основу оригінальної кластерної багатофункціональної установки, що не має світових аналогів, для синтезу мікро- і наноструктурних складнокомпозиційних сполук, яку було розроблено і виготовлено спільно ХНУ і НФТЦ. В даний час на установці відпрацьовані технології отримання оксидів і нітриду металів Al, Ti, Ta, Zr і ін., що мають широке практичне застосування в машино-, верстато-, приладобудуванні та в медичній імплантології (Додаток А).

**Особистий внесок здобувача.** Посилання в даному пункті відповідають переліку праць, включених до дисертації. У всіх роботах, опублікованих за темою дисертації, здобувач брав вирішальну участь у постановці задачі, підготовці експериментів, обробці експериментальних даних і проведенні теоретичних розрахунків, написанні тексту статей.

У роботах [1-4] при дослідженнях іонно-пучкової плазми здобувач особисто розробив і підготував експериментальний діагностичний стенд з джерелом іонів «Радикал-М», брав безпосередню участь в експериментах і запропонував механізм зарядової компенсації ІП на основі вторинної іон-електронної емісії з поверхні мішені.

У роботах [5-7, 20, 22] по вивченню прискорювального режиму планарного магнетронного розряду здобувач брав участь у підготовці і проведенні експериментів і самостійно провів теоретичні розрахунки стаціонарних станів передшару і прианодного шару електронів.

У роботах [6-9, 11, 14, 19], присвячених вивченню комбінованого ВЧ індукційно-ємнісного розряду, здобувач особисто розробив конструкцію односіткового джерела низькоенергетичних іонів з внутрішнім індуктором і запропонував модель енергобалансу асиметричного плазмового конденсатора.

У роботах [13, 15, 16], в яких вивчається плазмохімічний реактор на базі ВЧ індукційного розряду, здобувач самостійно розробив і запустив в експлуатацію експериментальне обладнання, провів основні експерименти і

сформулював завдання для чисельно-аналітичного двовимірного моделювання дрейфово-дифузійного режиму.

У роботах [12, 21, 23] здобувач запропонував концепцію і розробив проект кластерної багатофункціональної установки з магнетроном низького тиску, джерелом плазми і прискорювачем з анодним шаром для нанесення складнокомпозиційних покриттів і безпосередньо брав участь у роботах по запуску обладнання і в проведенні основних експериментів.

У роботах [17, 22, 24], присвячених питанню виникнення газового розряду в схрещених ЕН полях, здобувач запропонував ідею проведення експериментів з сітчастим катодом, самостійно розробив модель пробою і запалювання розряду за участю різних груп електронів і провів теоретичні розрахунки.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на таких міжнародних конференціях: I, II Міжгалузеві науково-технічні семінари «Фізичні основи і нові напрями плазмової технології в мікроелектроніці», Харків, 1989, 1991; International Conference on Plasma Science, Santa Fe, 1994, Madison, 1995, San Diego, 1997, USA; Науково-практичні конференції «Вакуумна техніка і вакуумна технологія», Харків, 1995, 1997; 7th International Conference on Ion Sources, Taormina, Italy, 1997; II Міжнародна конференція «Фізика плазми і плазмові технології» (ФППТ-2), Мінськ, 1997; XXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Greifswald, Germany, 2003; Міжнародна наукова конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- і наноструктур», Харків, 2007; International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, Kharkiv 2014; International Conference on Plasma Electronics, Kharkiv, 2015.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 24 статтях у спеціалізованих виданнях, які відповідають вимогам атестаційної колегії МОН України, і захищені 3 патентами України, список яких наведено наприкінці автореферату.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, семи розділів основного тексту з 184 рисунками, висновків, одного додатку і списку літератури з 265 джерел.

Шість розділів присвячено вирішенню поставлених завдань дисертаційної роботи, які є відносно самостійними. Тому кожен розділ складається з короткого огляду літератури, опису експериментальних пристроїв і методів вимірювань, результатів експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків. Наприкінці кожного розділу проведено порівняння теорії та експерименту, а також сформульовані висновки.

У сьомому розділі узагальнено фізичні закономірності та характерні особливості плазмових систем із комбінованими ЕН полями, вивчених у розділах 1-6.

У Додатку А представлені приклади практичної реалізації результатів дисертаційної роботи, в кінці списку літератури наведені отримані патенти і публікації по прикладних результатах дисертації.

Повний обсяг дисертації складає 312 сторінок, рисунків, які розташовані за всією площею сторінки немає. Список використаних джерел інформації розташований на 25 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і завдання роботи, показаний зв'язок із науковими програмами і НДР, проведеними в ХНУ і НФТЦ, розкрито наукову новизну здобутих результатів і дано оцінку їх практичної цінності. Також відзначений особистий внесок здобувача до наукових робіт, виконаних із співавторами, і надано інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи.

**Перший розділ** роботи присвячено питанню виникнення газового розряду в пристроях з постійними схрещеними ЕН полями. У підрозділі 1.1 проведено огляд літератури, який показав, що за наявності магнітного поля відсутній загальний для всіх систем закон подібності пробою розрядного проміжку, аналогічний закону Пашена для вакуумного діода. Сформульовані завдання для експериментальних і теоретичних досліджень, обґрунтовано вибір експериментального пристрою.

Для вивчення процесів утворення газорозрядної плазми в схрещених ЕН полях, формування і транспортування іонних потоків в якості базового об'єкту досліджень використано серійне джерело іонів (ДІ) «Радикал» типу прискорювача з анодним шаром. Розрядний проміжок ДІ «Радикал» (рис. 1) представляє планарний магнетронний розряд з радіальним магнітним  $H$  і аксіальним електричним  $E$  полями. За величиною напруженість магнітного поля  $H$  є такою, що в області між катодом (К) і анодом (А) електрони є сильно замагніченими ( $\rho_{He} \ll d$ ,  $\rho_{He}$  – ларморів радіус електронів,  $d$  – відстань К-А) і формують замкнутий холлів струм в азимутальному напрямі, а іони є незамагніченими ( $\rho_{Hi} > d$ ,  $\rho_{Hi}$  – ларморів радіус іона) і створюють кільцевий пучок, що розповсюджується в аксіальному напрямі.

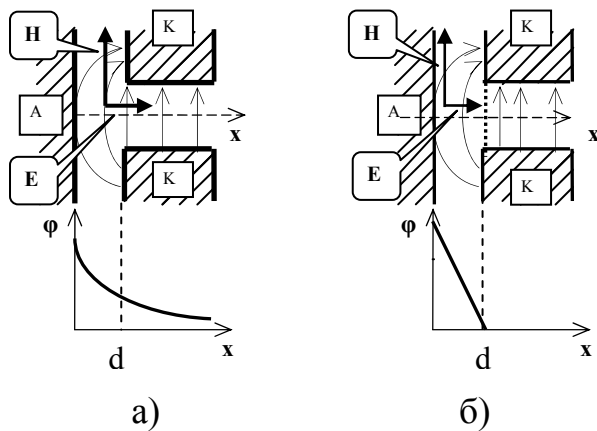


Рис.1. Схема розрядного проміжку без сітки (а) і з сіткою на катоді (б), а також якісний розподіл потенціалу уздовж потоку іонів.

У підрозділі 1.2 детально описано конструкцію ДІ «Радикал», представлені топологія екіпотенціалів і силових ліній магнітного поля, а також наведені основні параметри експериментальної установки: робочий тиск  $p = (0,2-1,0)$  мТорр; прискорювальна напруга  $U$  - до 7 кВ; напруженість

магнітного поля  $H$  - до 3кЕ; струм розряду  $I_p$  - до 0,3 А; діаметр кільцевого пучка - 100 мм; ширина пучка - 5 мм; робочі гази - інертні, хімічно активні.

У підрозділі 1.3 описані методики вимірювань і представлені результати досліджень процесів виникнення і згасання розряду: залежності значення напруги збудження розряду  $U_{np}$  від напруженості магнітного поля  $H$  (рис. 2), вольт-амперні характеристики (ВАХ) при різних  $H$  і тиску робочого газу у вакуумній камері  $p_k$ . Також були досліджені залежності струму розряду  $I_p$  і на мішень  $I_m$  від  $H$  при різних  $U$  і  $p_k$ . Усі наведені характеристики розряду були виміряні для двох випадків: 1) без сітки на катодній межі, коли вакуумне електричне поле є неоднорідним (рис. 1а); 2) за наявності сітки на внутрішній поверхні катода, коли вакуумне електричне поле є однорідним (рис. 1б).

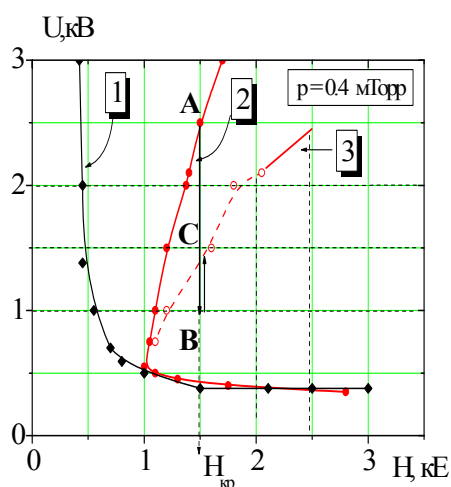


Рис.2. Крива запалювання розряду без сітки на катоді (1); крива пробую розряду з сіткою на катоді (2); крива згасання розряду з сіткою на катоді при збільшенні напруги (3) при постійному  $H$ .

$U_p$  приводить до стрибкоподібного згасання розряду, не досягаючи напруги пробую (ділянка В-С, рис. 2).

Феноменологічну модель виникнення планарного магнетронного розряду представлено в підрозділі 1.4. В основу моделі покладено класичну теорію Таунсенда електричного пробую вакуумного діода, адаптовано до умов магнітного поля. У моделі постульовані класична провідність електронів у магнітному полі  $\mu_{He} = e v_{ea} / m_e \omega_{He}^2 = const$  ( $v_{ea}$  – частота електрон-атомних зіткнень) та існування в розрядному проміжку двох груп електронів: електронів, що народилися в розрядному проміжку з невеликими початковими швидкостями (s-електронів), і електронів з великими початковими швидкостями, які інжектуються в розрядний проміжок уздовж силових ліній

Як видно з рисунка, нижні гілки кривих для обох випадків співпадають. Виникнення розряду при зростанні  $U$  і постійному магнітному полі  $H$  проходить плавно, практично з нульових значень розрядного струму. При зменшенні  $U$  гістерезисних явищ не спостерігається, виникнення та згасання розряду відбуваються при однакових значеннях  $U_{np}$ . Тому ці процеси можна визначити як «запалювання» розряду.

Навпаки, наявність катодної сітки істотно змінює вигляд верхньої гілки кривої і сам характер виникнення розряду. Крива істотно зміщується в область сильного магнітного поля (графік 2); виникнення розряду при збільшенні  $H$  і досягненні  $H_{кр}$  має характер «пробую» - стрибкоподібного падіння  $U$  і появи  $I_p$  достатньо великої величини (ділянка А-В, рис. 2); з'являється ефект гістерезису. Після пробую і, відповідно, падіння  $U_p$ , збільшення напруги

магнітного поля в результаті вторинної іон-електронної емісії ( $\gamma$ -електрони). Частина  $\gamma$ -електронів захоплюється в електромагнітну пастку внаслідок парних зіткнень і колективних процесів і утворює групу осцилюючих ос-електронів.

Принциповою відмінністю цих груп електронів є різна величина сумарної енергетичної ціни іона  $\eta = \varepsilon_C + \varepsilon_K$ , де  $\varepsilon_C$  - сумарні пружні та непружні втрати енергії електрона, які супроводжують один акт іонізації при парних зіткненнях електрона з атомами,  $\varepsilon_K$  - кінетичні втрати енергії (в електричному полі при постійній  $\mu_{He}$ ,  $\varepsilon_K \sim E^2$ ).

Скориставшись визначенням першого іонізаційного коефіцієнта Таунсенда  $\alpha = E/\eta$  і умовою пробою для s-електронів,  $\alpha_s \cdot d = \ln(1 + 1/\gamma_{eff})$ , яка відповідає розвитку електронних лавин ( $\gamma_{eff} = \chi \cdot \gamma$ ,  $\gamma$  - коефіцієнт вторинної іон-електронної емісії,  $\chi < 0,5$  - коефіцієнт захоплення електронів, залежний від тиску і магнітного поля), було отримано рівняння пробою розряду для випадку сильного однорідного електричного поля  $U/I > d/r_0$  в параметричній формі:

$$\varphi'_s = \frac{U}{I} = x^2 e^{1/x^2} \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{eff}}\right), \quad d'_s = \frac{d}{r_0} = x e^{1/x^2} \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{eff}}\right). \quad (1)$$

В області слабого електричного поля  $U/I < d/r_0$ , коли інтенсивна іонізація здійснюється тільки ос-електронами,  $\alpha_{os} \cdot d = (1 + 1/\gamma_{eff})$ , рівняння запалювання розряду в параметричній формі має вигляд:

$$\varphi'_{os} = \frac{U}{I} = (1,73 + x^2) \cdot \frac{1}{\gamma_{eff}}, \quad d'_{os} = \frac{d}{r_0} = \frac{1,73 + x^2}{x} \cdot \frac{1}{\gamma_{eff}}, \quad (2)$$

де відношення  $E/E_0 = x = \frac{U}{I} \cdot \frac{r_0}{d}$  є параметром, а  $r_0$  - просторовий масштаб. На

рис. 3 а,б представлені сімейства кривих запалювання і пробою розрядного проміжку для різних значень параметра  $\gamma_{eff}$ .

У планарному магнетронному розряді з неоднорідним електричним полем крива запалювання розряду визначатиметься рівнянням:

$$\frac{U}{I} = \frac{d_s}{r_0} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{r_0}{\gamma_{eff} d_s}\right), \quad (3)$$

де  $d_s$  - середня товщина шару. Графік рівняння (3) представлений на рис. 4а.

У підрозділі 1.5 проведено порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками і зроблені висновки, що різноманітність кривих виникнення розряду в магнітному полі, яка спостерігалася в експериментах, визначається наступними чинниками:

- існуванням двох механізмів процесу іонізаційного посилення струму первинних  $\gamma$ -електронів - розвитком електронних лавин у сильному електричному полі, іонізацією високоенергетичними ос-електронами в слабкому електричному полі;
- відмінністю коефіцієнта  $\gamma_{eff}$  для кожного процесу, обумовленого неоднорідністю силових ліній магнітного поля і двовимірними ефектами;

- неоднорідністю електричного поля.

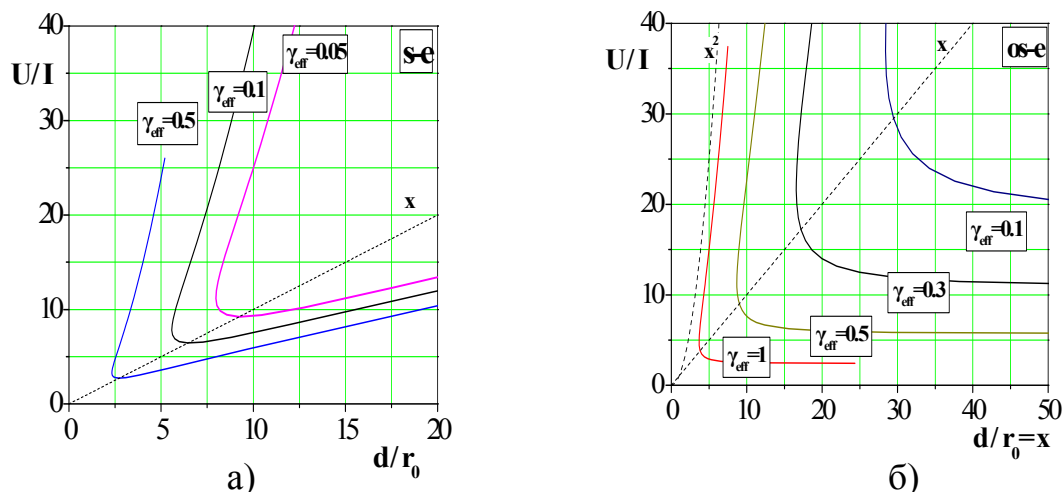


Рис. 3. Криві пробою розряду s-електронами (а) і криві запалювання розряду os-електронами (б) у планарному магнетронному розряді при різній величині  $\gamma_{eff}$ , розраховані згідно рівнянням (1), (2).

Роль цих чинників можна визначити у кожному конкретному випадку з форми кривих запалювання/пробою, а по мінімальним значенням напруги і напруженості магнітного поля оцінити величину  $\gamma_{eff}$ . Так на рис. 4 представлені теоретичні і експериментальні криві пробою і запалювання розряду, отримані для ДІ «Радикал».

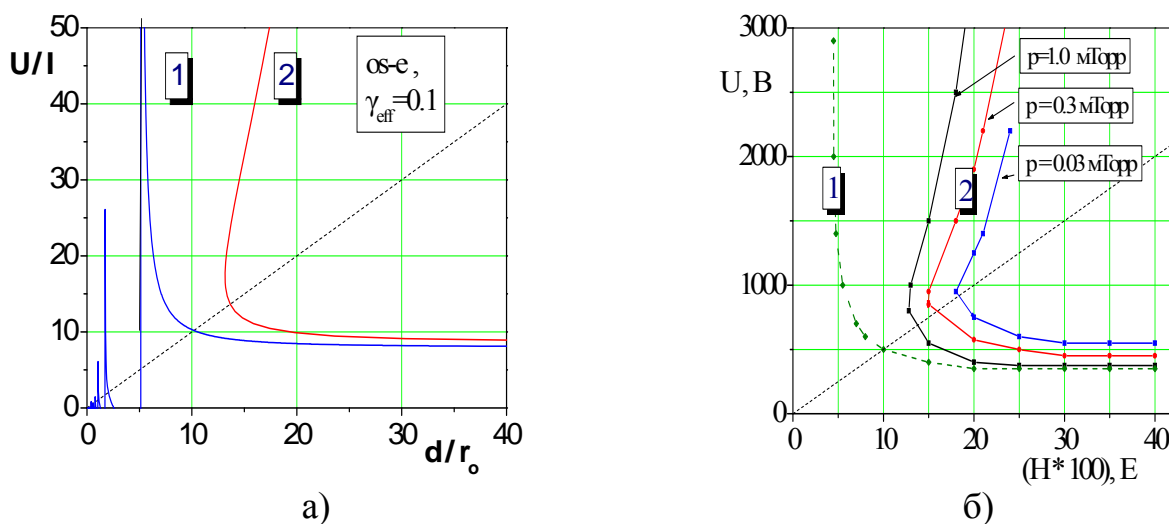


Рис. 4. Розраховані згідно рівнянням (2), (3) (а) і експериментальні (б) криві запалювання і пробою розряду в розрядному проміжку з однорідним 2 і неоднорідним 1 електричним полем.

Згідно проведеним оцінкам у нашому випадку  $U = I/\gamma_{eff} = 300$  В,  $r_0 = 3 \cdot 10^{-2}$  см ( $H=1$  кЕ),  $d/r_0=40$  ( $H=4$  кЕ), а форма кривих показує визначальну роль механізму запалювання розряду os-електронами.

У другому розділі дисертаційної роботи наведені результати досліджень прискорювального режиму планарного магнетронного розряду, при якому генеруються іони з енергією  $\varepsilon_i = (1-3)$  кеВ.

У підрозділі 2.1 наведено огляд літератури з питань формування прианодного електронного шару в схрещених ЕН полях при низькому тиску робочого газу,  $p < 1$  мТорр, у газорозрядних пристроях з різною геометрією електродів (розряд Пеннінга, циліндричний обернений магнетрон, прискорювач з анодним шаром). Відзначено, що в проведених раніше дослідженнях недостатньо враховували існування перехідної області – передшару із слабким електричним полем, вплив граничних умов на стаціонарні параметри анодного шару і, відповідно, інтегральні характеристики ПМР в прискорювальному режимі. Сформульовані завдання досліджень.

У підрозділі 2.2 представлено опис діагностичного стенду для вивчення потоків заряджених частинок у ПМР на базі ДІ «Радикал» методом балансу струмів у зовнішніх ланцюгах розрядного пристрою і зондовим діагностичним комплексом. Результати експериментальних досліджень інтегральних характеристик планарного магнетронного розряду в широкому діапазоні зовнішніх параметрів: розрядної напруги, індукції магнітного поля, тиску робочого газу, наведені в підрозділі 2.3.

Особливістю проведених експериментальних досліджень було одночасне вивчення розрядних характеристик і динаміки локальних параметрів плазми в області передшару: ФРЕЕ, густини струму на зовнішній і внутрішній катоди, аксіального розподілу потенціалу плазми і температури електронів. Основним результатом цих досліджень стало визначення тонкої структури розрядного проміжку ПМР (рис. 5), в якій можна виділити три характерні області:

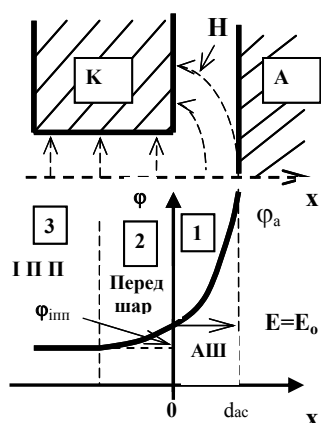


Рис. 5. Структура прианодної області ПМР, яка лежить в основі теоретичної моделі.

1. Прианодний шар з сильним електричним полем ( $E > 100 - 200$  В/см), в якому відбувається розвиток електронних лавин, а ФРЕЕ істотно відрізняється від максвеллової.
2. Проміжна область – передшар з електричним полем  $E < (100 - 200)$  В/см, де в електронів існує локально-рівноважна ФРЕЕ, близька до максвеллової з характерною величиною електронної температури  $T_e = (3-15)$  еВ. Із зменшенням відстані до анода температура електронів і потенціал плазми монотонно збільшуються.
3. Область іонно-пучкової плазми (ІПП) із слабким електричним полем  $E < 10$  В/см. У цій області електронна температура  $T_e = (1-3)$  еВ, потенціал плазми  $\varphi_{pl} \sim 1$ .

У підрозділі 2.4 представлено дрейфову теорію стаціонарних станів ПМР у прискорювальному режимі для вдосконаленої феноменологічної моделі системи передшар-прианодний шар, в якій межа анодного шару відповідає початку розвитку електронних лавин.

Здобуто аналітичні вирази для розподілів потенціалу і густини струму електронів для передшару із слабким електричним полем:

$$\frac{\Phi}{1,73} = \frac{1}{18} \cdot J_{zp} \cdot X^3, \quad J = \frac{1}{18} \cdot J_{zp}^2 \cdot X^3, \quad (4)$$

коли основна іонізація здійснюється ос-електронами, і в анодному шарі з сильним електричним полем, коли розвиваються електронні лавини:

$$\Phi = \frac{1}{2}(E'^2 - 1) - (J_{zp} - 1) \cdot X, \quad X = E' - 1 - (J_{zp} - 1) \cdot \ln \left[ \frac{E' - 1 + J_{zp}}{J_{zp}} \right], \quad (5)$$

де  $\Phi = \varphi / I$ ,  $J = j / j_0$ ,  $E' = E / E_0$ ,  $X = x / x_0$ ,  $J_{zp} = j_{zp} / j_0 = n_{zp} / n_0 = N$ ,

$$\text{а } j_0 = \frac{\mu_{He}}{4\pi} \cdot \frac{I}{x_0^3} = \frac{\mu_{He}}{4\pi I} \cdot E_0^3, \quad E_0^2 = \frac{v_i I}{e \mu_{He}}, \quad x_0^2 = \frac{v_c}{v_i} \cdot \frac{I}{m \omega_{He}^2}, \quad E_0 x_0 = I -$$

нормуючі параметри. На рис. 6 представлений розрахований розподіл потенціалу, а на рис. 7 – ВАХ при різних значеннях граничного параметра  $N$ . Величина  $N \ll 0,1$  відповідає вакуумному режиму,  $0,1 < N < 1$  відповідає режиму з іонно-пучковою плазмою, а  $N > 1$  - режиму з термокатодом. На рисунках точками А, В, С, D позначені ділянки, які відповідають різним стадіям розряду згідно з експериментальними даними: А-В – початкова стадія, В-С – лінійна ділянка ВАХ, С-D – нелінійна ( $I_p \sim U^{1/2}$ ) ділянка ВАХ, що відповідає збільшенню товщини анодного шару.

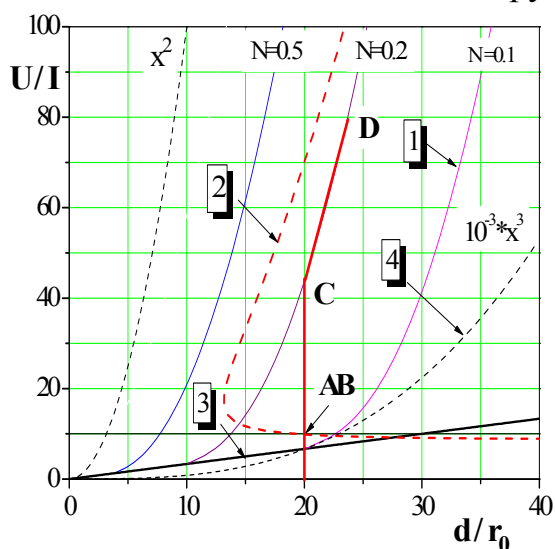


Рис.6. Розподіл нормованого потенціалу в ПМР при комбінованій системі передшар-прианодний шар. 1 - анодний шар, 2 - крива запалювання ос-електронами, 3 – межа шар – передшар, 4 - передшар.

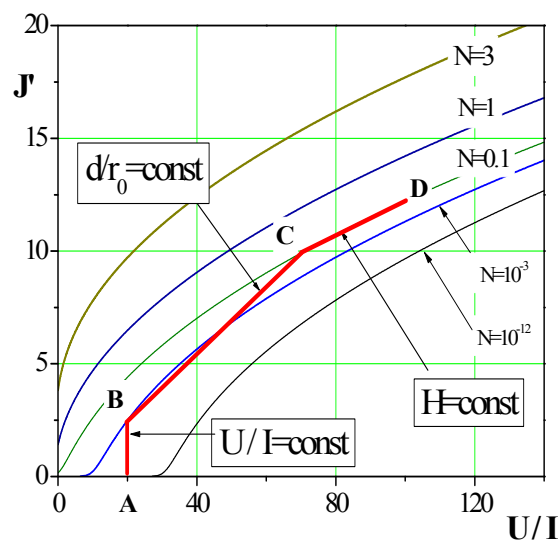


Рис.7. Розраховані вольт-амперні характеристики розряду з анодним шаром при різних значень параметра  $N = J_{zp}$ . Точки А-В-С-D визначають ділянки ВАХ, що відповідають експериментальним даним та ділянкам на рис. 6.

У підрозділі 2.5 проведено порівняльний аналіз експериментальних даних з теоретичними розрахунками і зроблені висновки про гарну кількісну і якісну відповідність теорії експериментальним даним.



У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто плазмовий режим планарного магнетронного розряду, при якому генеруються іони з енергією  $\varepsilon_i = (0,5-1)$  кеВ.

У підрозділі 3.1 проведено огляд науково-технічної літератури про газорозрядні характеристики ПМР: ВАХ, залежностей струму розряду від тиску робочого газу, величини і топології магнітного поля. Проаналізовані теоретичні моделі магнетронного розряду, сформульовані завдання досліджень. Одним із основних питань, що не отримало вичерпного фізичного пояснення, є існування порогу згасання магнетронного розряду в залежності від тиску робочого газу.

Експериментальне дослідження цього питання проводилося на установці, принципову схему якої наведено на рис. 8. Опис магнетрона із змінною геометрією силових ліній магнітного поля приведений у підрозділі 3.2.

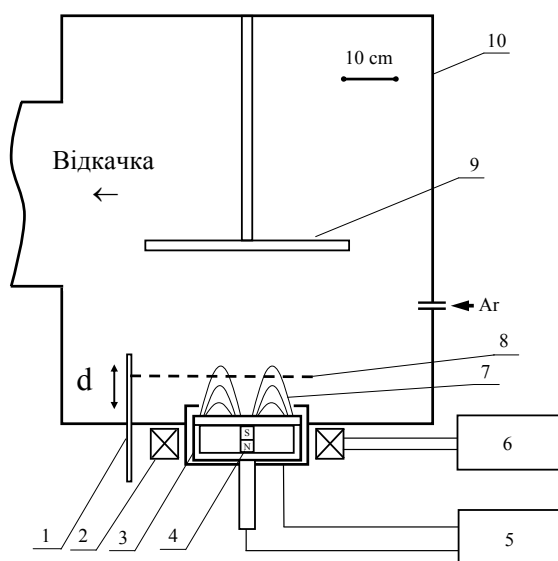


Рис. 8. Принципова схема експериментальної установки. 1 – рухомий анод, 2 – соленоїд зовнішнього магнітного поля, 3 – магнетрон, 4 – постійний магніт, 5 – блок живлення магнетрона, 6 – блок живлення соленоїда, 7 – силові лінії магнітного поля, 8 – сітка анода, 9 – столик для зразків, 10 – вакуумна камера.

Магнітна система магнетрона складалася із зовнішнього соленоїда 2 і центральних змінних постійних магнітів 4 з напруженістю магнітного поля  $H=1000, 1500$  Е на поверхні мішені. Струм соленоїда змінювався в межах  $I_c=(0-10)$  А. Залежно від конфігурації силових ліній магнітного поля 7, що визначається співвідношенням напруженості магнітного поля центрального магніту та зовнішнього соленоїда, істотно змінюються основні характеристики магнетронного розряду – вольт-амперні характеристики і мінімальний тиск існування магнетронного розряду  $p_{ign}$ . Вимірювання показали, що максимальна висота іонізаційної пастки  $d_i$ , яка визначається висотою арок магнітних силових ліній, які йдуть на катод, відповідає мінімуму  $p_{ign}$ . Це дало підставу припустити, що саме розмір області іонізації визначає мінімальний тиск існування магнетронного розряду.

Для перевірки альтернативним способом впливу розміру іонізаційної пастки на тиск згасання магнетронного розряду були проведені наступні експерименти. У робочій камері установки було змонтовано рухомий анод 1, виготовлений з неіржавіючої сітки 8 діаметром 300 мм, який обмежував відстань катод – сітчастий анод  $d$  без зміни топології магнітного поля. Для збалансованого магнетрона, коли  $d_i$  максимальна, були виміряні  $p_{ign}$  для різної величини  $d$ .

Результати вимірювань  $p_{ign}(d)$  при зменшенні відстані катод-сітка  $d$  представлені на рис. 9 в логарифмічному масштабі (графіки 1-3). На цьому ж рисунку показані результати моделювання силових ліній магнітного поля, що демонструють взаємозв'язок мінімального тиску існування магнетронного

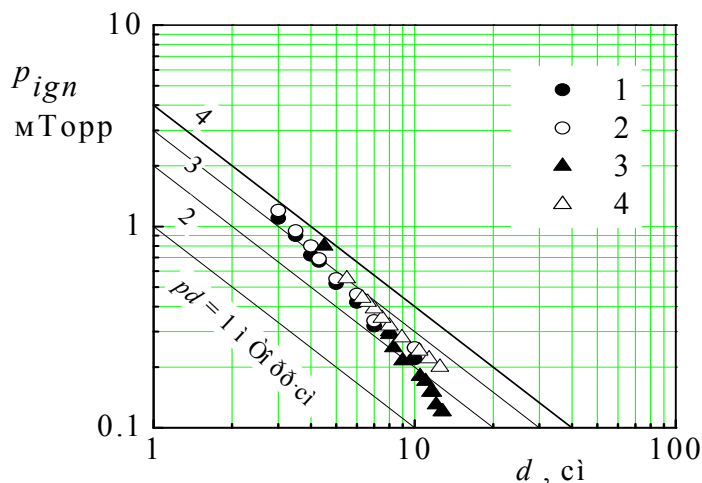


Рис. 9. Залежності тиску згасання розряду  $p_{ign}$  у збалансованому магнетроні від відстані мішень-сітчастий анод  $d$  при різних струмах розряду  $I_p$ : 1 – 1 А, 2 - 2 А, 3 – 3 А, 4 - 4 А, від висоти арок силових ліній магнітного поля  $d_i$ .

розряду від висоти арок силових ліній магнітного поля  $d_i$  (графік 4).

Детальне дослідження ВАХ ПМР з використанням автоматизованої системи вимірювань з виведенням даних на комп'ютер виявило наступні особливості (рис. 10). Як області малих розрядних струмів, так і при великих значеннях  $I_p$  – напруга на розряді має стабілітронний характер, а величина  $U_p$  знижується при збільшенні  $p$  і  $H$ . Функціональна залежність на проміжній ділянці також змінюється залежно від тиску  $I \sim U^n$  ( $n=2-8$ ).

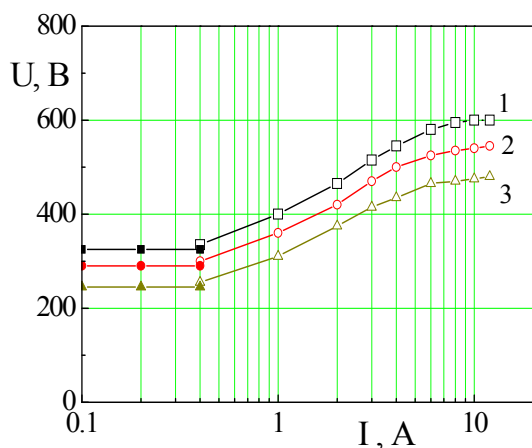


Рис. 10. ВАХ магнетронного розряду в напівлогарифмічному масштабі при різному тиску аргону:

- 1 -  $p = 0,5$  мТорр,
- 2 -  $p = 0,6$  мТорр,
- 3 -  $p = 1,0$  мТорр.

Для пояснення здобутих експериментальних даних було розроблено просторово-усереднену модель ПМР, яку представлено в підрозділі 3.3. Модель враховує існування в плазмі двох груп електронів з різними ФРЕЕ: первинних високоенергетичних ос-електронів, захоплених в електромагнітну пастку з моно-енергетичною ФРЕЕ, і групи вторинних плазмових електронів з максвелловою ФРЕЕ.

У межах застосовності моделі з рівняння балансу заряджених частинок, при апроксимації швидкості іонізації  $K_i$  рівнянням Ареніуса  $K_i = K_0 \exp(-eI / T_e)$ ,

було здобуто вираз для рівноважної електронної температури  $\tau = T_e / eI$ , що нормується на потенціал іонізації  $I$ :

$$(n_a d_i) = \frac{t^{1/2} e^{1/\tau} \cdot (I/M)^{1/2}}{1 + \delta \cdot e^{1/\tau} \cdot K_0}, \quad (6)$$

де  $\delta = n_{os} / n_i$  – параметр, що визначає відносну частку  $os$ - електронів у плазмі,  $K_0$  - стала, яка залежить від сорту газу. Рівняння (6) визначає рівноважні значення температури плазмових електронів від параметра подібності  $n_a d_i$ , що нормується на величину  $(n_a d_i)_0 = (I/M_i)^{1/2} / K_0$ .

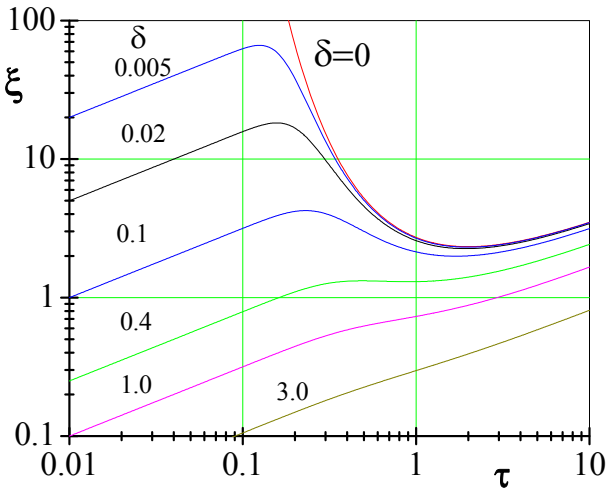


Рис. 11. Залежності  $\xi = (n_a d)'$  від нормованої електронної температури  $\tau = T_e / eI$  при різних концентраціях  $os$ -електронів  $\delta = n_{os} / n_i$

Графік залежностей  $\xi = (n_a d)' = n_a d_i / (n_a d_i)_0$  від  $\tau$  при різних значеннях  $\delta$  представлений на рис. 11. З рисунка видно, що наявність у моделі двох груп електронів привела до виникнення широкого спектру розв'язків у порівнянні з однозначним взаємозв'язком між електронною температурою і тиском для максвеллової плазми ( $\delta = 0$ ).

З рівняння балансу енергії заряджених частинок з урахуванням одночасної іонізації  $os$ - і  $p$ -електронами було отримано аналітичний вираз для сумарної енергетичної ціни іона  $\eta'_\Sigma = \eta_\Sigma / eI$ , яка визначає величину напруги на розряді  $U = \eta_\Sigma / \gamma_{eff}$ :

$$\eta'_\Sigma = 1,73 + \tau + \frac{1,73 \cdot (e^{0,2/\tau} - 1) \cdot (n_a d_i)'}{\tau^{1/2} \cdot e^{1/\tau}} \quad (7)$$

Функцію  $\eta'_\Sigma$  при різних значеннях параметра  $(n_a d_i)'$  представлено сімейством графіків на рис. 12.

Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень проведено в підрозділі 3.4. На основі аналізу зроблені наступні висновки про механізм планарного магнетронного розряду в плазмовому режимі:

1. Для ПМР параметром подібності  $\epsilon p d_i \sim n_a d_i$ , де  $d_i$  – характерний розмір іонізаційної пастки. Максимальне значення  $d_i$  відповідає максимальній висоті арок силових ліній магнітного поля, що спираються на катод.
2. Параметри  $n_a d_i$  і  $\delta$  визначають рівноважну температуру електронів і границю існування плазмового режиму магнетронного розряду, а також поріг згасання по тиску робочого газу.
3. Температура електронів і параметр  $n_a d$  визначають співвідношення струмів іонів, що народилися в результаті іонізації  $os$ - і  $p$ -електронами, і сумарну енергетичну ціну іона  $\eta_\Sigma$ .

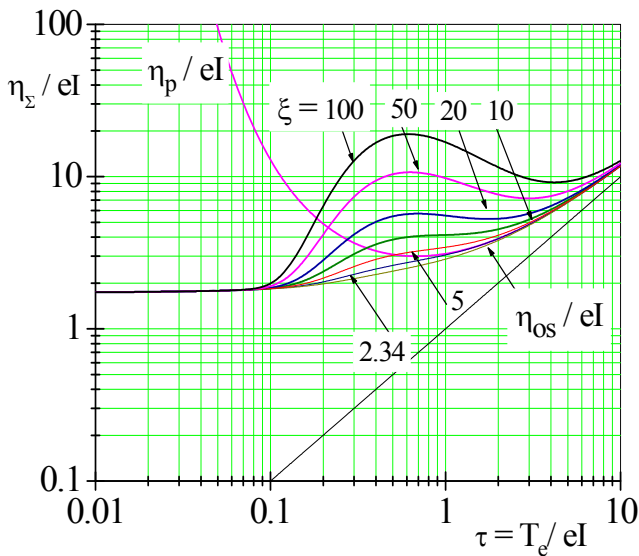


Рис. 12. Сумарна нормована енергетична ціна іона  $\eta_{\Sigma}'$  залежно від нормованої електронної температури  $\tau$  при різних значеннях параметра подібності  $(n_a d_i)' = \xi$ .

типів. Основними причинами широкого застосування ВЧІ розряду є:

- низка енергія іонів  $\varepsilon_i \sim 10-40$  eV;
- можливість незалежного управління густиною струму  $j_i$  і енергією іонів у широких межах:  $j_i = 0,1 - 100$  mA/cm<sup>2</sup>,  $\varepsilon_i = 30 - 10^4$  eV;
- можливість тривалої роботи з хімічно активними газами;
- відносна простота конструктивних рішень плазмохімічних реакторів і джерел іонів з характерними геометричними розмірами оброблюваної поверхні від 1 до 10<sup>3</sup> см.

У підрозділі 4.1 наведено огляд літератури, що стосується особливостей збудження ВЧІ розряду і його характеристик при низькому тиску робочого газу, сформульовані завдання досліджень.

Експериментальне устаткування і опис методів дослідження представлені в підрозділі 4.2. Експериментальними пристроями були:

- циліндричний ВЧІ розряд із зовнішнім кільцевим індуктором;
- планарний плазмохімічний реактор на базі ВЧІ розряду з торцевим спіральним індуктором;
- ВЧІ джерело низькоенергетичних іонів з внутрішнім індуктором.

Для кожної конструкції були виміряні інтегральні характеристики ВЧІ розряду: залежності порогу запалювання від тиску робочого газу  $p_{min}$ , ватт-амперні характеристики і радіальні розподіли густини струму іонів  $j_i$ , температури електронів і потенціалу плазми залежно від параметрів системи, які представлені в підрозділі 4.3. У таблиці наведені геометричні параметри досліджуваних експериментальних пристроїв з ВЧІ розрядом і значення  $(pd_{eff})_{min}$ , отримані в експериментах.

4. Мінімальна величина  $\eta_{\Sigma}$  визначається іонізацією тільки ос-електронами, а максимальна іонізацією тільки  $p$ -електронами.

5. Функціональна залежність  $T_e$  від густини струму  $\gamma$ -електронів або потужності, що вкладається в іонізацію, визначає вольт-амперну характеристику магнетронного розряду в плазмовому режимі.

У розділі 4 представлені результати досліджень процесу генерації потоку низькоенергетичних іонів у ВЧІ індукційному розряді. На цей час більше 60% устаткування для іонно-плазмових технологій розроблено на базі ВЧІ розряду і його комбінацій з розрядами інших

	Циліндричний ВЧІ розряд	Планарний реактор	Джерело іонів
$R$ , см	10	7	12,5
$L$ , см	10	6	8
$d_{eff}$ , см	5	3,2	4,88
$p_{min}$ , мТорр	0,3	0,4	0,25
$(pd_{eff})_{min}$ , мТорр·см	1,5	1,28	1,22

У підрозділі 4.4 розглянуто просторово усереднену модель ВЧІ розряду та умови її використання для визначення порогу запалення розряду від тиску робочого газу. Було використано рівняння балансу частинок для знаходження рівноважних значень  $T_e$  залежно від параметра подібності  $(pd_{eff}) \sim (n_a d)$ , де  $d_{eff} = V/S$ ,  $V$  – об'єм області іонізації,  $S$  – площа поверхні виходу іонів. Його розв'язок при апроксимації швидкості реакції іонізації  $K_i$  рівнянням Ареніуса має вигляд:

$$(n_a d_{eff}) = \left( \frac{T_e}{eI} \right)^{1/2} \cdot e^{eI/T_e} \cdot \frac{(I/M)^{1/2}}{K_0} \cdot h, \quad (8)$$

де  $h$  – параметр, що характеризує неоднорідність густини плазми.

На рис. 13 представлені залежності нормованої електронної температури  $t = T_e/eI$  від параметра  $pd = 0,5(n_a d_{eff})$ , розраховані для аргону згідно з рівнянням (8). Як впливає з рисунка, поріг згасання/запалювання ВЧІ розряду визначається мінімальним значенням  $(pd_{eff})_{min}$ , при якому існують рівноважні значення  $T_e$ .

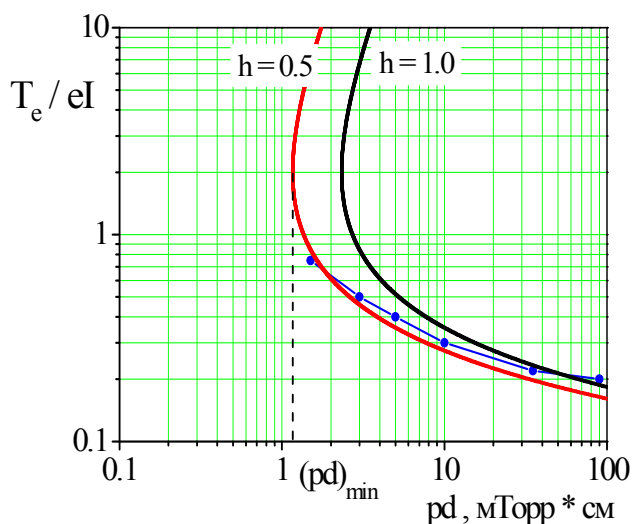


Рис. 13. Залежність  $T_e/eI$  від параметра подібності  $pd = 0,5(n_a d_{eff})$  при різному значенні параметра  $h$  згідно (8). Точками показані експериментальні значення нормованої  $T_e/eI$ .

Для опису ВЧІ розряду при високому тиску і визначення границі застосовності просторово усередненої моделі було розроблено двомірну гідродинамічну модель, засновану на чисельному розв'язанні рівнянь амбіполярної дифузії, теплопостачання і рівнянь для електромагнітного поля. Це дало можливість оцінити достовірність розрахунків за допомогою “глобальної” і двомірної гідродинамічної моделі.

Порівняння результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними проведено в підрозділі 4.5, на його підставі зроблені наступні висновки:

1. Поріг запалювання ВЧІ розряду визначається мінімальним значенням параметра  $(n_a d_{eff}) \sim (pd)_{min}$ , вище якого існує рівноважна температура електронів.
2. Мінімальне значення  $(pd)_{min}$  залежить від максимальної швидкості реакції іонізації  $K_0$  робочого газу даного сорту.
3. Основними чинниками, що впливають на просторову однорідність потоку іонів, є тиск і сорт робочого газу, геометрія ГРК і місце розташування індуктора.
4. Збільшення тиску понад  $pd > 20$  мТорр·см призводить до істотної просторової неоднорідності плазми і густини струму іонів, обумовленої зменшенням довжини релаксації енергії електронів і збільшенням градієнта електронної температури. Це обмежує застосування просторово-усередненої моделі при зростанні тиску робочого газу.

**Розділ 5** присвячений питанню керування параметрами потоку іонів у комбінованих ВЧ індукційно-ємнісному (ВЧІЄ) та індукційно-магнетронному (ВЧІМ) розрядах, які стали основою для розробки комплексу плазмових технологічних модулів (Додаток 1). Електромагнітний спосіб передачі енергії в плазму індукційного розряду відкриває можливість використовувати потенційне електричне поле – постійне, високочастотне, імпульсне, для управління енергією іонів на задану поверхню, забезпечуючи незалежне управління густиною струму іонів.

У підрозділі 5.1 наведено огляд літератури, присвяченої питанням фізики ВЧ ємнісного розряду, зокрема, ВЧ діодному ефекту, який є основним при формуванні потоків заряджених частинок у комбінованому ВЧІЄ розряді. Сформульовані завдання експериментальних і теоретичних досліджень для визначення оптимальних параметрів комбінованого розряду для ефективної іонізації робочого газу і формування низькоенергетичних іонних потоків.

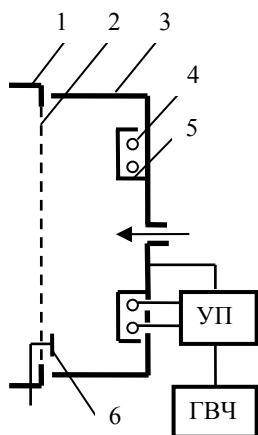


Рис. 14. Принципова схема джерела низькоенергетичних іонів. 1 – перехідний фланець робочої камери; 2 – заземлена сітка-емітер іонів; 3 – металевий корпус ГРК, що є ВЧ електродом; 4 – двовитковий індуктор; 5 – електростатичний екран; 6 – електричний зонд.

Експериментальні дослідження ВЧІЄ розряду проводилися в одно сітковому джерелі іонів низької енергії (рис. 14). У циліндричній газорозрядній камері (ГРК) 3 з внутрішнім діаметром 250 мм і довжиною 80 мм було змонтовано двовитковий екранований індуктор 4, що забезпечував передачу енергії в плазму. До індуктора через узгоджувальний пристрій (УП) було підведено ВЧ потужність (13,56 МГц) у діапазоні 0 – 1000 Вт від ВЧ генератора (ГВЧ). На виході джерела розташовано металеву сітку-емітер іонів 2 товщиною

0,12 мм з отворами діаметром 0,24 мм. ВЧ або постійна напруга амплітудою (0-300) В було прикладено між заземленою сіткою і корпусом ГРК.

У підрозділі 5.2 приведені інтегральні характеристики ВЧІЄ розряду в діапазоні тиску  $p < 10$  мТорр, коли самостійний розряд ВЧЄ не запалюється. Тому в цьому діапазоні тиску ВЧІ розряд можна вважати базовим, а ВЧЄ розряд, що забезпечує прискорення іонів в приелектродних шарах при слабкому впливі на процеси іонізації, - додатковим. Унаслідок експерименту було встановлено, що ватт-амперні характеристики та залежності параметрів ВЧІЄ розряду від тиску якісно аналогічні ВЧІ розряду. Для ВЧІЄ розряду так само існує мінімальне значення ВЧ потужності  $p_{min}$  при якому відбувається згасання розряду.

Було виявлено, що особливістю ВЧІЄ розряду є зниження сумарної енергетичної ціни іона при подачі ВЧ потенціалу на електроди системи, залежне від співвідношення площ електродів  $\delta = S_2/S_1$ .

У підрозділі 5.3 сформульовано модель енергетичного балансу іонів у асиметричному ВЧІЄ розряді. Для моделі були проведені розрахунки розподілу потоків енергії на електроди системи. Найбільш цікавим результатом виявилась наявність максимуму нормованої ВЧ потужності  $p_1 = P_1/P_0$  ( $P_0$  - сумарна ВЧ потужність), що вкладається в прискорення іонів на електрод з меншою площею

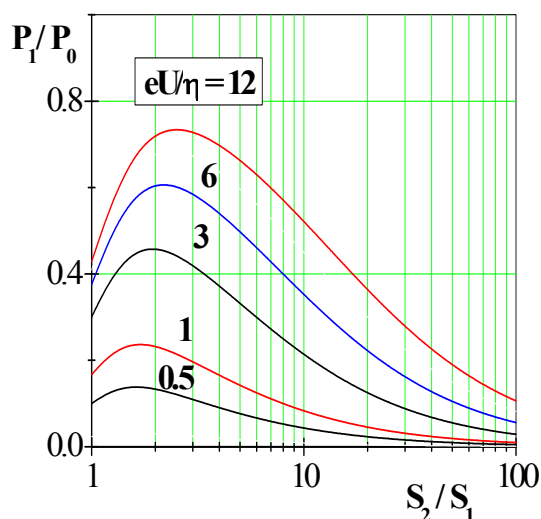


Рис.15. Залежність нормованої потужності  $P_1/P_0$  на електрод меншої площі від співвідношення площ електродів  $\delta=S_2/S_1$  при різних значеннях нормованої амплітуди ВЧ потенціалу  $eU / \eta$  ( $\eta$  - сумарна енергетична ціна іона).

У підрозділі 5.5 розглянуто комбінований ВЧ індукційно-магнетронний розряд. Підкреслено, що, застосування в магнетронних розпорозувальних системах (МРС) додаткових пристроїв для іонізації газу і розпорозених атомів обумовлено необхідністю забезпечити роботу МРС при зниженому тиску робочого газу, що сприяє отриманню плівок високої чистоти, додатково активувати хімічно активні

(рис. 15). Як видно з рисунка, величина  $p_1$  залежить від  $\delta$  і амплітуди ВЧ напруги  $U$ , що нормується на енергетичну ціну іона. Порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними дало можливість зробити наступні висновки.

Основний вплив потенційного ВЧ електричного поля на ВЧІ розряд виявляється в зниженні сумарної енергетичної ціни іона і призводить до кількісних змін в інтегральних характеристиках розряду.

Асиметрія площ ВЧ електродів має принципове значення в енергобалансі комбінованого ВЧІЄ розряду і впливає на величину сумарної енергетичної ціни іона та енергетичну ефективність плазмових реакторів і джерел іонів на базі комбінованого ВЧІЄ розряду.



частинки, використовувати ефекти іонного бомбардування для впливу на кінетику зростання плівок.

У підрозділі 5.6 представлено опис експериментальної установки з комбінованим ВЧІМ розрядом (рис. 16), методик і результатів вимірювань параметрів плівок.

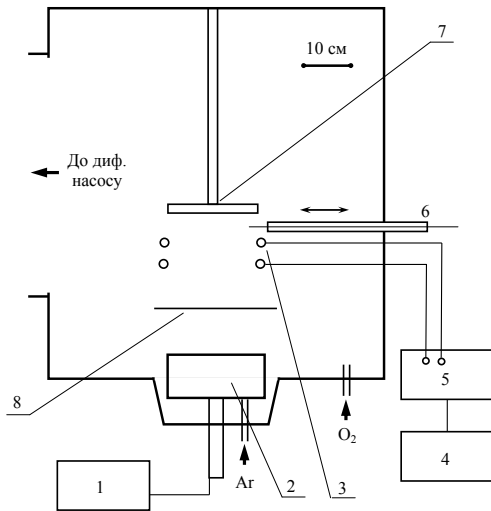


Рис. 16. Принципова схема установки з комбінованим індукційно-магнетронним розрядом для реактивного іонно-плазмового синтезу складнокомпозиційних покриттів.

1 – блок живлення магнетрона, 2 – магнетрон, 3 – індуктор для збудження ВЧ індукційного розряду, 4 – ВЧ генератор, 5 – узгоджувальний пристрій, 6 – електричний зонд, 7 – столик для зразків, 8 – екран магнетрона.

Було виміряно густину струму іонів  $j_i$  в площині столика для зразків за допомогою плоского зонда в режимі насичення іонного струму і залежності  $j_i$  від параметрів системи, які показали наступне.

Густина іонного струму  $j_i$  лінійно залежить від потужності як магнетронного, так і індукційного розрядів, проте енергетична ефективність ВЧІ розряду для генерації іонів є істотно вищою.

Зниження робочого тиску при постійній потужності призводить до монотонного зниження  $j_i$  для обох розрядів. Разом із тим, у діапазоні тиску  $p = (0,6-3)$  мТорр зміна  $j_i$  не перевищує 20%.

Однорідність іонного бомбардування столика для зразків (діаметр 200 мм) для ВЧІ розряду складає 80%.

На рис. 17 наведені залежності для струму на мішень магнетрона при різній потужності ВЧІ розряду при тиску  $p=0,3$  мТорр, а на рис. 18 представлені ВАХ магнетронного і комбінованого індукційно-магнетронного розрядів при тиску  $p=0,6$  мТорр, коли може горіти самостійний магнетронний розряд.

Для пояснення експериментальних даних було розроблено модель енергобалансу ВЧІМ розряду, яку представлено в підрозділі 5.7. Основою моделі є просторово усереднена модель ВЧ індукційного розряду, яку було доповнено тим, що іонізація робочого газу здійснюється плазмовими електронами, які отримують енергію від двох джерел: ВЧ-генератора та  $\gamma$ -електронів, прискорених у катодному шарі. З рівняння балансу енергії було отримано вираз для вольт-амперної характеристики ВЧІМ розряду в безрозмірних величинах:

$$\frac{\gamma_{eff} \cdot eU}{\eta} = 1 - \frac{1}{I_i/I_0}, \quad (9)$$



де  $I_i = I_\gamma + I_0$  – сумарний струм іонів на мішень магнетрона,  $I_\gamma$  – струм іонів, що народилися за рахунок внеску енергії  $\gamma$ -електронів,  $I_0$  – струм іонів, що народилися за рахунок енергії ВЧ генератора. Рівняння (9) після відповідних перетворень відповідає характеристикам, наведеним на рис. 18 (графік 3).

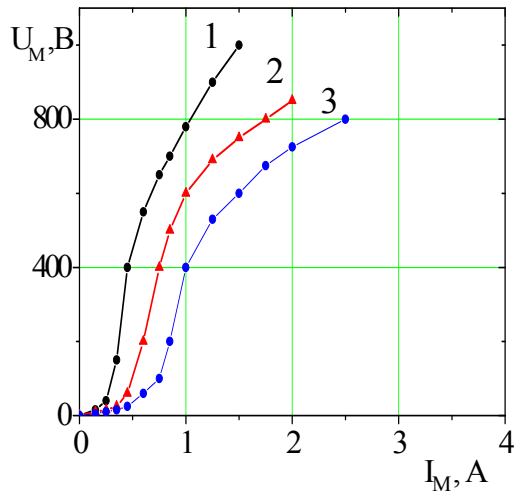


Рис.17. Залежності потенціалу  $U_M$  від величини струму  $I_M$  на мішень магнетрона при різній потужності ВЧІ розряду: 1–200 Вт; 2 – 400 Вт; 3 – 600 Вт. Тиск робочого газу  $p = 0,4$  мТорр.

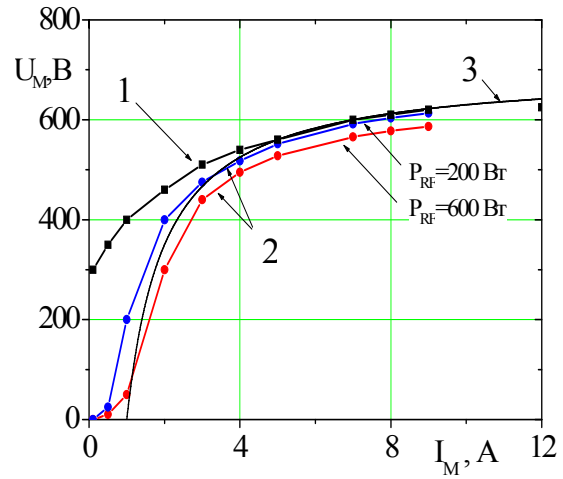


Рис.18. ВАХ самостійного магнетронного 1 і комбінованого ВЧІМ 2 розрядів при різній потужності ВЧ генератора.  $p = 0,6$  мТорр. Пунктирна лінія 3 - теоретичний розрахунок згідно моделі енергобалансу ВЧІМ розряду.

Підсумовуючи результати проведених досліджень, для комбінованого ВЧ індукційно-магнетронного розряду можна виділити три діапазони тиску робочого газу, що відрізняються режимами з пріоритетом індукційного або магнетронного розряду:

1. В діапазоні тиску  $0,1 \text{ мТорр} < p < 0,3 \text{ мТорр}$  горить лише самостійний ВЧ індукційний розряд. Подача напруги на мішень магнетрона лише трохи впливає на параметри розряду, зокрема, на ВАХ.
2. В діапазоні тиску  $0,3 \text{ мТорр} < p < 0,6 \text{ мТорр}$  самостійний магнетронний розряд не запалюється, проте наявність електромагнітної пастки для вторинних  $\gamma$ -електронів значно підвищує генерацію іонів у розряді при подачі негативної напруги на мішень магнетрона. Це істотно впливає на ВАХ, і розряд можна вважати несамоістиним магнетронним розрядом (рис. 17).
3. В діапазоні тиску  $p > 0,6 \text{ мТорр}$  горить самостійний магнетронний розряд. Поблизу порогу запалювання при малих розрядних струмах характер ВАХ є аналогічним індукційно-магнетронному розряду (графік 2 на рис. 18), проте, при великих струмах магнетронного розряду ( $I > 5 \text{ А}$ ) вплив ВЧ індукційного розряду на ВАХ є незначним (рис.18).

Дослідження комбінованого ВЧІМ розряду дали можливість отримати додаткову інформацію про вплив вторинної іон-електронної емісії з поверхні електродів на характеристики і енергетичний баланс ВЧІ розряду. Наявність

електромагнітної пастки в області потенційного електроду дає можливість істотно збільшити густину іонного струму на цей електрод за рахунок використання енергії вторинних  $\gamma$ -електронів для іонізації робочого газу.

**Розділ 6** присвячений дослідженням зарядової і струмової нейтралізації низькоенергетичних іонних пучків у ППС. Актуальність дослідження цієї проблеми визначається тим, що іонно-пучкова плазма (ППП), яка утворюється в просторі транспортування потоку іонів, забезпечуючи зарядову і струмову компенсацію пучка, є до того ж активним середовищем, з якого на оброблювану поверхню потрапляють заряджені, збуджені, хімічно активні частинки і електромагнітне випромінювання. Особливості формування ППП у просторі транспортування низькоенергетичних іонів розглянуті в підрозділі 6.1. Сформульовано мету досліджень: вивчення і узагальнення закономірностей формування параметрів ППП для ППС з джерелами іонів різних типів. На рис. 19 представлені принципові схеми цих систем.

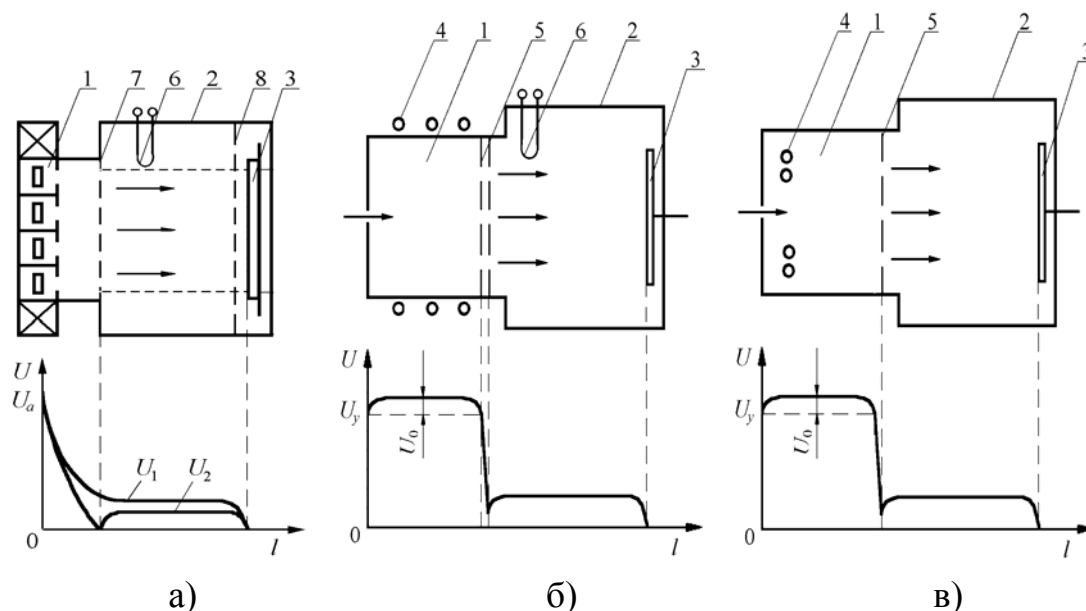


Рис. 19. Принципові схеми ППС з прискорювачем іонів "Радикал-М" (а), двоступінчатим джерелом іонів на основі ВЧІ розряду (б), одноістчастим ДІ на базі комбінованого ВЧІЄ розряду (в) і відповідні якісні розподіли потенціалів уздовж пучка іонів ( $U_1$  - без екрануючої сітки;  $U_2$  - з екрануючою сіткою 7). 1 - джерело іонів; 2 - вакуумна камера; 3 - мішень; 4 - індуктор; 5 - іонно-оптична система; 6 - термокатод; 7 - екрануюча сітка; 8 - антидіатронна сітка.

У підрозділі 6.2 наведено опис експериментальних установок, методик досліджень основних параметрів ППП-потенціалу плазми, швидкості утворення електронів, їх ФРЕ, та основні результати. Головним інструментом досліджень були електричні зонди, які могли переміщатися по камері для зняття просторових розподілів параметрів ППП.

Експериментально було встановлено, що значення потенціалу іонно-пучкової плазми  $\phi_{pl}$ , тобто стала рівноважна глибина потенційної ями для електронів, істотно залежить від коефіцієнта вторинної іон-електронної емісії матеріалу мішені  $\gamma$ . Для кількісних оцінок цієї залежності було використано

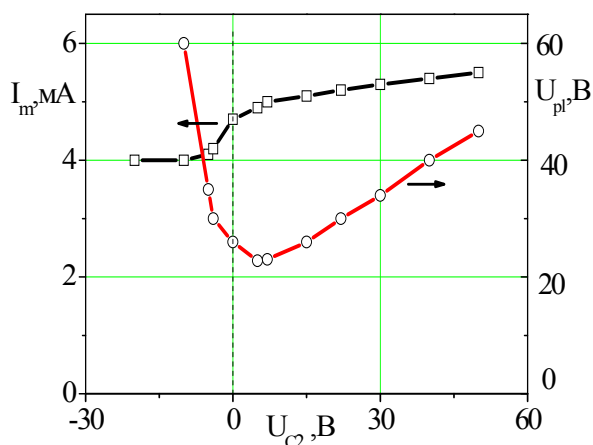


Рис.20. Залежності струму на мішень  $I_m$  і потенціалу іонно-пучкової плазми  $\phi_{pl}$  від потенціалу антидінаatronної сітки  $U_{c2}$ .

екранування мішені антидінаatronною сіткою 8 з високою прозорістю, встановленою на відстані 1 мм від поверхні мішені (рис. 19а).

На рис. 20 наведено залежності струму на мішень  $I_m$ , що складається зі струмів іонів і  $\gamma$ -електронів, та потенціалу іонно-пучкової плазми  $\phi_{pl}$  від потенціалу  $U_{c2}$  антидінаatronної сітки 8. Як видно з рисунка, в області  $U_{c2} > 0$ , коли потенціал сягає значення  $U_{c2} \sim \phi_{pl} \sim 10$  В, сітка стає додатковим ефективним стоком для електронів плазми, і потенціал  $\phi_{pl}$  починає зростати пропорційно  $U_{c2}$ .

При  $U_{c2} < 0$  відбувається запирання  $\gamma$ -електронів біля поверхні мішені та повний струм на мішень  $I_m$  зменшується, а потенціал іонно-пучкової плазми швидко зростає. При  $U_{c2} < -5$  В струм  $\gamma$ -електронів у об'єм практично відсутній, і настає повна розкомпенсація пучка, що спричиняє зрив стійкої роботи джерела іонів. Було встановлено, що причиною цього явища є значний стік електронів з ІПП в розрядні комірки джерела іонів.

Дослідження ФРЕЕ показали, що її характерною рисою є наявність трьох груп електронів: низькотемпературного максвеллового ядра з температурою  $T_e = 0.2 - 0.5$  еВ і густиною  $n_e$ , яка практично співпадає з густиною  $n_b$  пучка іонів  $n_e \approx n_b \approx 10^8$  см<sup>-3</sup>; групи  $\gamma$ -електронів, енергія яких перевищує  $e\phi_{pl}$  на величину початкової енергії  $\gamma$ -електронів  $\sim (2-5)$  еВ, а густина складає  $\sim 10^5$  см<sup>-3</sup>; "проміжної" немаксвеллової групи, густина і форма якої може мінятися в широких межах.

У підрозділі 6.3 розглянуто просторово-усереднену феноменологічну модель іонно-пучкової плазми, побудовану на основі енергобалансу заряджених частинок. Вважалось, то ІПП складається з чотирьох компонент заряджених частинок: іонів пучка,  $\gamma$ -електронів, повільних іонів, народжених унаслідок іонізації та резонансної перезарядки, і замкнених в потенційній ямі низько енергетичних електронів. Для форми потенційної ями для електронів характерне існування практично постійного значення потенціалу в межах геометричних меж пучка, унаслідок чого потенціал плазми, температура і ФРЕЕ є нелокальними параметрами та характеризують всю систему в цілому. Ця обставина дала можливість провести просторове усереднювання основних параметрів плазми.

Аналіз показав, що сукупність процесів, що відбуваються в іонно-пучковій плазмі можна охарактеризувати як несамостійний безелектродний газовий розряд низького тиску. Наявність зовнішнього високоенергетичного пучка іонів забезпечує інтенсивну вторинну іон-електронну емісію з поверхні

мішені і, відповідно, низькі значення потенціалу плазми  $\varphi_{pl} \sim I$ , а величина  $\varphi_{pl}$  та решта всіх параметрів ППД надзвичайно чутливі до емісійних характеристик матеріалу мішені та витоку плазмових електронів.

Гарний збіг результатів дрейфової теорії з експериментальними даними дав можливість зробити висновок про адекватний опис моделлю реальних процесів у ППД. Відзначимо, що аналіз швидкостей утворення нейтралізуючих захоплених електронів по всіх наявних каналах показав, що максимальна швидкість за будь-яких умов менше струму ПД, тобто струмова автокомпенсація без додаткової інжекції електронів є неможливою.

Результати експериментальних досліджень параметрів ППД ( $\varphi_{pl}$ ,  $T_e$ ,  $\Phi_{PEE}$ ) за наявності зовнішніх інтенсивних джерел електронів для різних іонно-плазмових систем представлені в підрозділі 6.4. Найпростішим варіантом джерела електронів є термокатод (ТК) – вольфрамовий дріт, нагрітий до температури інтенсивної термоелектронної емісії  $\sim 2000^\circ \text{C}$  і розташований у просторі транспортування ПД (рис. 19 а,б). Також джерелом електронів може бути плазма комбінованого ВЧ індукційно-ємнісного розряду при використанні односіткової ІОС (рис. 19 в).

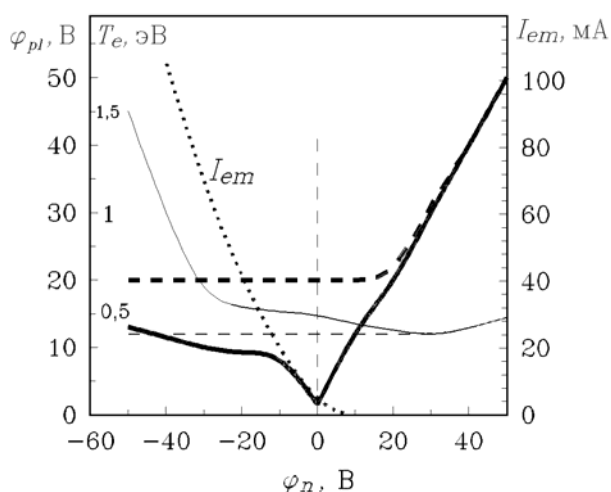


Рис. 21. Залежності  $\varphi_{pl}$ ,  $T_e$  і тока емісії  $I_{em}$  від потенціалу дроту ТК  $\varphi_n$ . Потовщені лінії —  $\varphi_{pl}$ , тонкі —  $T_e$ . Штриховими лініями показані аналогічні залежності за відсутності напруги ТК. Для всіх графіків анодна напруга  $U = 1.5$  кВ, робочий газ — аргон.

$p = 0.4$  м Торр,  $I_d = 9$  мА

Найцікавішим здобутим експериментальним результатом є залежності  $\varphi_{pl}$  та  $T_e$  від потенціалу нейтралізатора  $\varphi_n$  відносно стінок камери, представлені на рис. 21. Аналіз залежностей показує, що при негативних значеннях  $\varphi_n$  виникає струм термоелектронів на стінки камери. Але, як видно з рисунка, збільшення струму емісії не лише не знижує  $\varphi_{pl}$ , а, навпаки, призводить до його швидкого зростання, тобто до погіршення нейтралізації. Цей факт свідчить про те, що термоелектрони безпосередньо не можуть компенсувати об'ємний заряд іонів пучка, а компенсація проводиться низькоенергетичними електронами, замкненими в потенціальній ямі просторового заряду іонів. Термоелектрони можуть потрапляти до числа замкнених, якщо втрачають

енергію в непружних зіткненнях з атомами газу або при кулонових зіткненнях з плазмовими електронами.

Також у підрозділі 6.4 представлені результати досліджень ППД при генерації біполярного іон-електронного потоку односітчастим ВЧ джерелом іонів (рис. 19в). Вимірювання показали, що числа електронів, що емітуються з

джерела, достатньо для повної компенсації струму пучка іонів і можливе керування величиною потенціалу мішені. На цей спосіб формування іон-електронних потоків отримано Патент України (Додаток 1).

У розділі 7 розглянуто загальні закономірності та відмінності іонно-плазмових систем із різними комбінаціями ЕН полів на основі порівняння оригінальних моделей ІПС, розроблених у дисертаційній роботі. У підрозділі 7.1 визначено загальні для всіх моделей параметри подібності і нормування фізичних величин у дрейфовій теорії ІПС з ЕН полями.

Як показали проведені дослідження, найбільш універсальною характеристикою для порівняння всіх типів розглянутих ІПС є сумарна енергетична ціна іона  $\eta$ . Ця величина включає як сумарні пружні та непружні втрати енергії електрона  $\varepsilon_c$ , що супроводжують один акт іонізації при парних зіткненнях електрона з атомами, так і кінетичну енергію  $\varepsilon_k$  заряджених частинок:  $\eta = \varepsilon_c + \varepsilon_k$ . Втрати  $\varepsilon_c$  визначаються виглядом ФРЕЕ, а  $\varepsilon_k$  залежить від просторового розподілу потенціалу і відрізняється для різних типів розрядів.

На рис. 22 представлені залежності нормованої величини сумарної енергетичної ціни іона  $\eta / eI$  від нормованої величини середньої енергії електрона  $t = T_e / eI$  при  $\varepsilon_k = T_e$  для різних  $\varepsilon_c$ , тобто ФРЕЕ – моноенергетичної для *os*-електронів, максвеллової для *p*-електронів та згідно моделі Таундсена для *s*-електронів.

На рис. 23 представлено залежності  $\eta / eI$  для *p*-електронів при різних  $\varepsilon_k / eI = (1, 2, 5, 7) t$ .

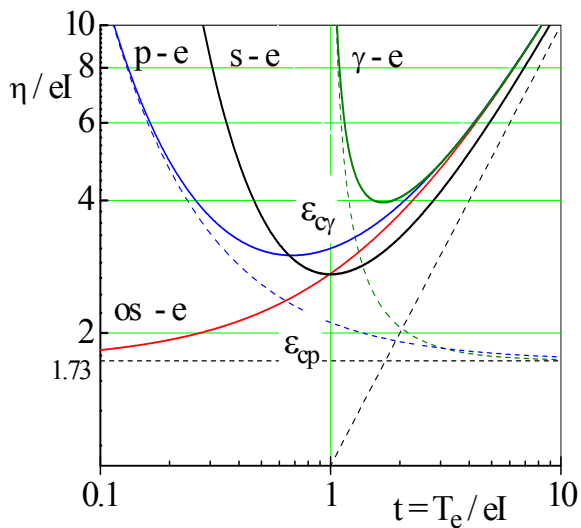


Рис.22. Залежність сумарної енергетичної ціни іона  $\eta / eI$  для *p*-, *s*- та *os*-електронів і сумарних непружних втрат для  $\gamma$ -електронів  $\varepsilon_{cy}$  і *p*-електронів  $\varepsilon_{cp}$  (пунктир) від нормованої електронної температури  $t = T_e / eI$ .

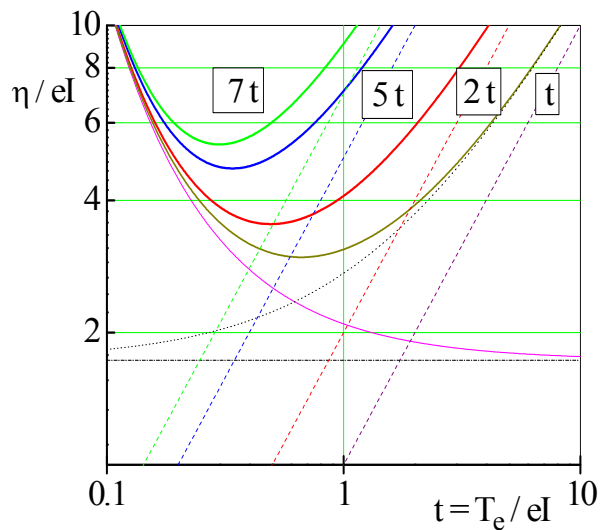


Рис.23. Залежність нормованої сумарної енергетичної ціни іона  $\eta / eI$  для плазмових *p*-електронів з максвелловою ФРЕЕ від нормованої електронної температури  $t = T_e / eI$  при різних значеннях  $\varepsilon_k / eI = (1, 2, 5, 7) t$  (пунктир).

Як витікає з наведених графіків, величина  $\eta$  дає можливість порівняти іонізаційну ефективність ансамблів електронів з різними ФРЕЕ в плазмі з різними приелектродними шарами просторового заряду.

На підставі проведеного аналізу були зроблені наступні висновки: потенціал іонізації  $I$  та мінімальна довжина іонізації  $l_m$  (мінімальна довжина, на якій електрон набирає енергію  $eI$ ) є загальними параметрами нормування енергії та простору для всіх моделей; сумарна, нормована енергетична ціна іона  $\eta/eI$  і величина  $d/l_m$  є енергетичними і просторовими параметрами подібності; для ПС без магнітного поля  $d/l_m \sim pd$ , а за наявності магнітного поля і класичної провідності електронів  $d/l_m \sim Hd$ .

У підрозділі 7.2 розглянуто окремі випадки застосування рівняння балансу густини заряджених частинок для задач виникнення і розрахунку стаціонарних станів газових розрядів в ПС з різними комбінаціями ЕН полів. Проаналізовані пробій і запалювання газового розряду у вакуумному та магнітоізолюваному діодах, прискорювальний і плазмовий режими генерації іонів у плоскому магнетронному розряді. На підставі аналізу побудовано узагальнюючу діаграму існування різних режимів ПМР залежно від температури електронів, тиску робочого газу і геометричних розмірів (рис. 24). Графіки на рисунку визначають наступні режими і параметри ПС:

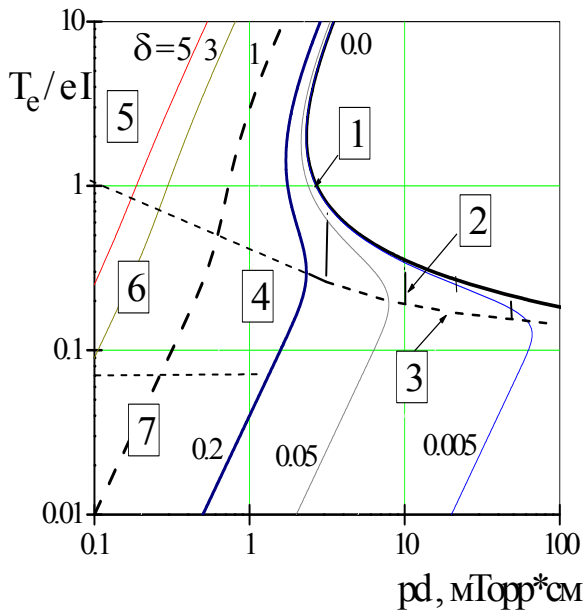


Рис. 24. Діаграма існування стаціонарних і перехідних режимів ПМР.

1 - індукційний розряд; 2 - ПМР в плазмовому режимі; 3 - крива виникнення ПМР; 4 - перехідний режим ПМР; 5 - прискорювальний режим ПМР; 6 - режим запалювання ПМР у прискорювальному режимі; 7 - іонно-пучкова плазма.

Графік 1 відповідає параметрам ВЧ індукційного розряду.

Область 2 визначає рівноважні значення електронної температури і межу існування ПМР в плазмовому режимі.

Графік 3 відповідає виникненню ПМР в плазмовому та прискорювальному режимах.

Область 4 відповідає перехідному режиму ПМР.

Області 5, 6 відповідають прискорювальному режиму ПМР.

Область 7 визначає параметри іонно-пучкової плазми.

У підрозділі 7.3 розглянуто загальний вигляд рівняння балансу енергії заряджених частинок і його окремі випадки, що дозволили розрахувати ватт- і вольт-амперні характеристики ВЧ індукційного та магнетронного розрядів у плазмовому режимі.

На основі аналізу розроблених просторово



усереднених моделей розрядів побудовано узагальнені вольт-амперні характеристики ІПС, графіки яких наведені на рис.25:

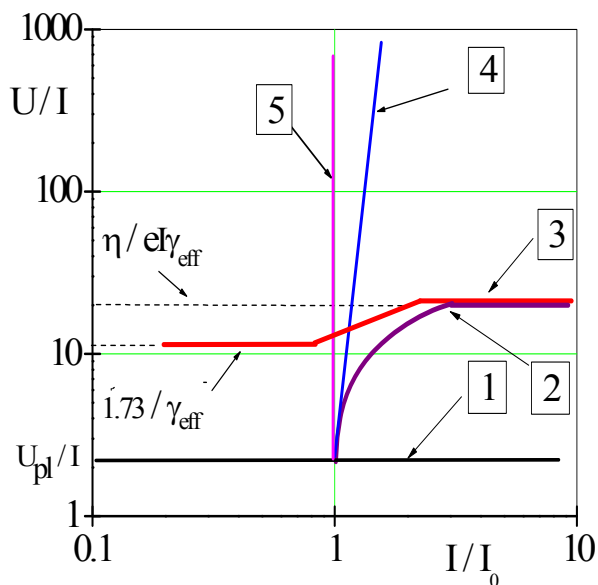


Рис. 25. Узагальнені вольт-амперні характеристики іонно-плазмових систем з комбінованими ЕН-полями.

роль вторинно-емісійних процесів з поверхні електродів та геометрії ГРК, що відіграють істотну, а у низці випадків визначальну роль у формуванні стаціонарних режимів ІПС ЕН-полями.

У підрозділі 7.5 визначено границі застосовності дрейфових моделей для опису ІПС з комбінованими ЕН-полями.

Наприкінці розділу 7 зроблені висновки, що дрейфові одновимірні моделі ІПС дають можливість отримати аналітичні розв'язки рівнянь балансу частинок і енергій і проаналізувати фізичні механізми формування кривих запалювання і основних характеристик розряду. У низці випадків вони дають не лише якісну, але і гарну кількісну відповідність експериментальним даним.

У Висновку дисертаційної роботи узагальнено результати проведених експериментальних і теоретичних досліджень і сформульовані висновки.

У Додатку А представлені приклади практичної реалізації результатів дисертаційної роботи:

1. Іонно-плазмові устаткування з автономними джерелами іонів низьких і середніх енергій.
2. Реактор РІПТ на базі ВЧ індукційно-ємнісного розряду.
3. Магнетронна розпорощувальна система низького тиску з додатковою активацією робочого газу.
4. Багатофункціональна кластерна система для реактивного іонно-плазмового синтезу складнокомпозиційних сполук.
5. Спосіб нейтралізації пучків іонів низької та середньої енергії та контролю іонно-плазмових технологічних процесів.

Графік 1 визначає ватт-амперну характеристику ВЧ індукційного розряду, яка відповідає генерації потоку іонів з низькою енергією ( $\varepsilon_i \sim 10-30$  eV).

Графіки 2, 3 визначають ВАХ планарного магнетронного і комбінованого ВЧІМ розрядів у плазмовому режимі, які відповідають генерації потоку іонів з середньою енергією ( $\varepsilon_i \sim 300-700$  eV).

Графіки 4, 5 визначають ВАХ комбінованого ВЧІС розряду та комбінованого ВЧІМ розряду у прискорювальному режимі, які відповідають генерації потоків іонів з високою енергією ( $\varepsilon_i \sim (1-3)$  keV).

У підрозділі 7.4 систематизовано просторовий масштаб, граничні умови,

## ВИСНОВОК

Відповідно до поставленої мети і завдань досліджень, у дисертаційній роботі на основі фундаментальних законів збереження енергії, імпульсу та частинок визначені узагальнені характеристики плазмових систем з комбінованими ЕН полями і встановлено діапазон параметрів для максимально ефективного формування інтенсивних іонних потоків з різною енергією. На базі результатів експериментальних досліджень було розроблено феноменологічні моделі ІПС з різними комбінаціями ЕН полів і в дрейфовому наближенні аналітично отримані наступні фундаментальні результати:

- розраховані криві пробою і запалювання газового розряду в постійних ЕН полях з різними механізмами іонізаційного посилення струму електронів для прискорювального і плазмового режимів;
- визначені параметри подібності, спільні для систем без магнітного поля і з магнітним полем в потенціальному і вихровому електричних полях;
- встановлені закономірності в інтегральних характеристиках планарного магнетронного розряду для прискорювального і плазмового режимів генерації іонних потоків: ВАХ, залежностях струмів заряджених частинок від напруженості магнітного поля і тиску робочого газу з урахуванням геометричних чинників;
- визначені причини існування порогу згасання по тиску робочого газу плазми в системах з об'ємною іонізацією на базі магнетронного і ВЧ індукційного розрядів і чинники, що впливають на просторову однорідність і енергію потоку іонів;
- розраховані оптимальні параметри комбінованих ВЧ індукційно-ємнісного та індукційно-магнетронного розрядів для енергетично ефективної іонізації робочого газу, незалежного керування густиною струму та енергією іонів;
- знайдено загальні закономірності процесів формування іонно-пучкової плазми для джерел іонів на базі плазмових систем з різними комбінаціями ЕН полів.

Таким чином, основним результатом проведених теоретичних досліджень є створення цілісної, логічно не суперечливої, фізичної картини процесів, що протікають в ІПС з комбінованими полями ЕН в області низького тиску робочого газу, найбільш оптимальною для генерації і транспортування іонних потоків. Загальним для всіх ІПС чинником для створення стаціонарної плазми при низькому тиску робочого газу є формування електростатичної або електромагнітної пастки для електронів за допомогою комбінації ЕН полів, сформованих як за рахунок зовнішніх систем, так і внаслідок існування шарів просторового заряду.

Також для всіх систем з постійним електричним полем принципову роль грає вторинна іон-електронна емісія з поверхні електродів та інжекція первинних, високоенергетичних  $\gamma$ -електронів до газорозрядного об'єму. Саме  $\gamma$ -електрони, захоплені в пастку, створену ЕН полями, іонізують газ у початковій



стадії розряду і є джерелом енергії для створення густої плазми і досягнення великих значень струмів заряджених частинок.

Проведені фундаментальні дослідження продемонстрували, що використання комбінованих електричних і магнітних полів у іонно-плазмових системах дають можливість у широких межах керувати потоками іонів, хімічно активних частинок і розпорошених атомів. Застосовуючи різні комбінації потенціального електричного поля (постійного, високочастотного, імпульсного) і вихрових електромагнітних полів, а також постійного магнітного поля для локалізації плазми, можливо цілеспрямовано формувати потоки частинок із заданими властивостями: густиною струму, енергією, хімічним складом і геометричними розмірами. Можна виділити наступні основні фактори дії ЕН полів на процеси формування іонних потоків.

1. Схрещені постійні електричне і магнітне поля з напруженістю, що забезпечує сильне замагнічення електронів, дають можливість:

- створювати газовий розряд при низькому тиску робочого газу,
- локалізувати газорозрядну плазму в заданій області робочої камери,
- формувати шари просторового заряду електронів, що забезпечують інтенсивну генерацію і прискорення іонів,
- керувати потоками іонів в просторі транспортування.

2. Вихрові електричні і магнітні поля (електромагнітна хвиля) забезпечують створення низькотемпературної плазми з високою густиною і низькою енергією іонів при низькому тиску робочого газу, на два порядки меншому порівняно з розрядами з потенціальним електричним полем.

3. Комбіноване ВЧ потенціальне і вихрове електричні поля (комбінований ВЧІС розряд) дають можливість незалежно керувати густиною струму, енергією і зарядовою нейтралізацією інтенсивних низькоенергетичних іонних потоків.

4. Комбінування ВЧ вихрового електричного поля (ВЧ індукційний розряд) і схрещених постійних ЕН полів (планарний магнетронний розряд) дають можливість незалежно формувати потоки розпорошених атомів, хімічно активних частинок та іонів у комбінованому індукційно-магнетронному розряді.

Визначення цих закономірностей дало можливість вирішити низку прикладних завдань – розробити оригінальні плазмові системи для генерації іонних потоків із заданими параметрами: геометричними розмірами, енергією та густиною струму іонів для технологій РПТ і РПС. Здобуті результати доводять, що планарний магнетронний і ВЧ індукційний розряди за цілою низкою параметрів – енергетичною ефективністю, діапазоном робочого тиску, простотою реалізації пристроїв з різними геометричними розмірами, — і можливістю комбінування з додатковими електричними і магнітними полями є оптимальними для розробки іонно-плазмового технологічного устаткування.

На базі комбінованого індукційно-емісійного розряду з асиметричними електродами розроблені джерела взаємокомпенсуючих потоків низькоенергетичних іонів і електронів для технологій РПТ і РПС.

Комбінований індукційно-магнетронний розряд продемонстрував високу ефективність при реалізації технологій реактивного іонно-плазмового синтезу складнокомпозиційних покриттів.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Роль  $\gamma$ -электронов в механизме автокомпенсации ионного пучка / Зыков А.В., Марущенко Н.Б., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ.- 1989.- Т. 15, №. 9. - С. 9-13.
2. Функция распределения электронов в ограниченном пространстве транспортировки автокомпенсированного ионного пучка низкой энергии / Дудин С.В., Зыков А.В., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ.- 1991.- Т. 17, №. 6. - С. 22-26.
3. Low Energy Intcuse Ion Beam Space Charge Neutralization / Dudin S.V., Zykov A.V., Farenik V.I. // Review of Scientific Instruments.-1994, -V. 65, № 4, part II.- P. 1451-1453.
4. Влияние термоэлектронной эмиссии на компенсацию объемного заряда широкого пучка ионов низкой энергии / Дудин С.В., Зыков А.В. // Письма в ЖТФ.- 1994. - Т. 20, № 11.- С. 58-63.
5. Особенности динамики электронов в аксиально-неоднородном прианодном ЕН слое разряда низкого давления / Дудин С. В., Зыков А.В., Ушаков А.В. // Письма в ЖТФ. - 1995.- Т. 21, №2.- С. 25-30.
6. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда / Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И. // Письма в ЖТФ. -1996.- Т. 22, № 10. - С. 54-59.
7. Функция распределения электронов ионно-пучковой плазмы в неоднородных ЕН полях / Дудин С.В., Зыков А.В., Ушаков А.В., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т. 22, №23. - С. 43-48.
8. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде / Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. - 1998. - Т. 24, № 22. - С. 33 – 38.
9. Равновесные состояния ионно-пучковой плазмы с замагниченными электронами при низких давлениях / Дудин С.В., Зыков А.В., Ушаков А.В., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. - 1998. -Т. 24, №5. - С. 33-38.
10. Особенности зарядовой и токовой нейтрализации широкоапертурных пучков ионов низкой энергии в системах ионно-лучевого травления и нанесения покрытий / Дудин С.В., Зыков А.В., Калмыков Я.М., Ушаков А.В., Фареник В.И., Маишев Ю.П. // Труды ФТИРАН. - 1999. - Т. 15. - С. 60-86.
11. Зыков А.В. Стационарные состояния ВЧ индукционного разряда низкого давления вблизи порога погасания / Зыков А.В., Положий К.И. // Письма в ЖТФ. - 2000. - Т. 26, № 11. - С. 68-74.
12. Pulsed-plasma assisted magnetron methods of depositing TiN coating / Walkowicz J., Miernik K., Dudin S., Zykov A,V., Farenik V. // Surface and coating technology. - 2000. - V. 125. - P. 341-346.
13. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources / Igor Denysenko, Stanislav Dudin, Aleksandr Zykov , Nikolay Azarenkov // Physics of Plasmas. - 2002. - V. 9, № 11. - P. 4767-4775.

14. The energy balance of the asymmetric combined inductive-capacitive RF discharge at a low gas pressure / K.I. Polozhiy, A.V. Zykov, V.I. Farenik V. // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2003. - № 1. - P. 130-132.
15. ICP enhanced reactive magnetron sputtering system for synthesis of alumina coating / Jan Walkowicz, Aleksandr Zykov, Stanislav Dudin, Stanislav Yakovin, Rafal Brudnias // Tribologia. – 2006. - № 6. - P. 163-174.
16. 2D fluid model for interactive development of ICP technological tools / A.V. Gapon, A.N. Dahov, S.V. Dudin, A.V. Zykov, N.A. Azarenkov // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2006. - № 6. - P. 186-188.
17. Break-down of the magnetically insulated diode / I. A. Zagrebelnyy, A.V. Zykov, M.V. Glaznev // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2007. - № 1. - P. 197- 199.
18. High homogeneity 25 cm low-energy rf ion source with inherent electron compensation / S.V. Dudin, D.V. Rafalskyi, A.V. Zykov // Review of Scientific Instruments. - 2010.- V. 81, № 8.- P. 083302 (1-6).
19. Широкоапертурний високочастотний джерело іонів низької енергії з електронною компенсацією С.В. Дудин, Д.В. Рафальський, А.В. Зыков // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. - 2010. - № 2. - С. 52-55.
20. Characteristics of discharge in crossed EH fields near breakdown curve in acceleration and plasma regime / A. Jamirzoev, S.Yakovin, A. Zykov // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2013. - № 1. - P. 186-188.
21. Іонно-плазмова система для реактивного магнетронного нанесення покриттів / С.Д. Яковін, О.В. Зыков, С.В. Дудін, В.І. Фаренік, М.М. Юнаков // Фізическа інженерія поверхності. - 2014. - Т. 12, № 3.- С. 428-439.
22. Low pressure gas discharge in magnetically insulated diode / A.Jamirzoev, S.Yakovin, A. Zykov // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2015. - №1. - P. 259-262.
23. Стационарні режими магнетронного розряду / А.В. Зыков, С.В. Дудин, С.Д. Яковин // Фізическа інженерія поверхності. - 2015. - Т. 13, № 2. - С. 264-275.
24. A.V. Zykov. Ignition and break-down of the gas discharge in magnetic field / A.V. Zykov, N. A. Azarenkov // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics. - 2015. - № 1. - P. 259-262.

## АНОТАЦІЯ

**Зыков О.В. Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітними полями. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за фахом 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна.. – Харків 2016.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженням процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах з комбінованими

електричними і магнітними полями, які широко використовуються в технологіях іонно-плазмової обробки поверхні.

Вивчено процеси виникнення та інтегральні характеристики газових розрядів у пристроях з комбінованими електричними (постійним, високочастотним, потенціальним, вихровим) і магнітними (постійним, змінним) полями на базі планарного магнетронного розряду в прискорювальному і плазмовому режимах, ВЧ-індукційного розряду, комбінованих індукційно-ємнісного і індукційно-магнетронного розрядів.

Здобуто аналітичні вирази для енергетичної ціни іона і коефіцієнта іонізації для ансамблю електронів з різною функцією розподілу по енергіях і розраховано криві запалювання і пробою трьох типів газового розряду постійного струму в магнітному полі.

Експериментально і теоретично доведено зміну рівноважної температури плазмових електронів у планарному магнетронному розряді через існування групи високоенергетичних електронів, густина яких залежить від питомої потужності в розряді. Ця залежність визначає вольт-амперну характеристику розряду при низькому тиску робочого газу.

Експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано принципову роль асиметрії електродів у енергобалансі ВЧ індукційно-ємнісного розряду, її вплив на сумарну енергетичну ціну іона і енергетичну ефективність плазмових реакторів і джерел іонів, визначено енергетично оптимальні співвідношення площ електродів залежно від енергії іонів.

Проведено систематизацію процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах з комбінованими ЕН полями на основі дрейфової теорії, визначено загальні параметри подібності та закономірності іонно-плазмових систем на основі фундаментальних положень фізики газового розряду, низькотемпературної плазми і законів збереження частинок, імпульсу і енергії.

**Ключові слова:** іонний пучок, джерело іонів, магнетронний розряд, низькотемпературна плазма, іонно-плазмові системи, газовий розряд у магнітному полі.

## SUMMARY

**Zykov A.V. Generation and transport of ion fluxes in the plasma systems with combined electric and magnetic fields. – Manuscript.**

Thesis for Doctor degree of Science in Physics and Mathematics in speciality 01.04.08 - Plasma Physics. - V.N. Karazin Kharkiv National University. - Kharkiv 2016.

The thesis is devoted to experimental and theoretical study of ion beams generation and transport in plasma systems with combined electric and magnetic fields, which are widely used in the surface engineering plasma technologies .

The ignition processes and integral characteristics of gas discharges are studied in devices with the combined electric (DC, radio-frequency, potential and vortex) and magnetic (DC, AC) fields on the base of planar magnetron discharge in the

accelerating and plasma modes, inductively coupled discharge, combined inductive-capacity and inductive-magnetron discharges.

Analytical expressions for the ion energy cost and ionization coefficient for the electron group with different energy distribution function are derived and the three types of breakdown and ignition curves for direct-current gas discharge in the magnetic field have been obtained.

The change of equilibrium plasma electrons temperature in planar magnetron discharge have been established experimentally and theoretically, as a result of high-energy electrons group existence. The density of this electron group is depended from the discharge power and determines the current-voltage characteristics of discharge at low pressure of working gas.

Experimentally set and in theory grounded the principle role of electrodes surface asymmetry in energy balance of RF inductive-capacity discharge, its influence on the total ion power cost and power efficiency of plasma reactors and ion sources. Optimum correlations of electrodes areas for power efficiency, depending on ion energy have been obtained.

Systematization of generation and transport processes of ion beams were carried out for plasma systems with different combinations of EH fields. On the basis of drift theory and the conservation laws of particles, impulse and energy the general parameters of similarity and regularities of ion-plasma systems with combined EH fields have been investigated.

**Key words:** ion beam, ion source, magnetron discharge, low temperature plasma, ion-plasma system, gas discharge in magnetic field.

## АННОТАЦИЯ

**Зыков А.В. Генерация и транспортировка ионных потоков в плазменных системах с комбинированными электрическими и магнитными полями. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. – Харьков 2016.

Диссертационная работа посвящена исследованиям процессов генерации и транспортировки ионных потоков в плазменных системах с комбинированными электрическими и магнитным полями, которые широко используются в технологиях ионно-плазменной обработки поверхности.

Изучены процессы возникновения и интегральные характеристики газовых разрядов в устройствах с комбинированными электрическими (постоянным, высокочастотным, потенциальным, вихревым) и магнитными (постоянным, переменным) полями на базе планарного магнетронного разряда в ускорительном и плазменном режимах, ВЧ индукционного разряда, комбинированных индукционно-емкостного и индукционно-магнетронного разрядов.

Получены аналитические выражения для энергетической цены иона и коэффициент ионизации для ансамбля электронов с различной функцией

распределения по энергиям и рассчитаны кривые зажигания и пробоя газового разряда постоянного тока в магнитном поле трех типов.

Экспериментально и теоретически доказано изменение равновесной температуры плазменных электронов в планарном магнетронном разряде в результате существования группы высокоэнергетичных электронов, плотность которых зависит от удельной мощности в разряде. Эта зависимость определяет вольт-амперные характеристики разряда при низком давлении рабочего газа.

Экспериментально установлена и теоретически обоснована принципиальная роль асимметрии электродов в энергобалансе ВЧ индукционно-емкостного разряда, ее влияние на суммарную энергетическую цену иона, энергетическую эффективность плазменных реакторов и источников ионов, определены энергетически оптимальные соотношения площадей электродов в зависимости от энергии ионов.

Проведена систематизация процессов генерации и транспортировки ионных потоков в плазменных системах с комбинированными ЕН полями на основе дрейфовой теории, определены общие параметры подобия и закономерности ИПС на основе фундаментальных положений физики газового разряда, низкотемпературной плазмы и законов сохранения частиц, импульса и энергии.

Определение этих закономерностей позволило решить ряд прикладных задач – разработать оригинальные плазменные системы для генерации ионных потоков с заданными параметрами: геометрическими размерами, энергией и плотностью тока ионов для технологий реактивного ионно-плазменного травления и реактивного ионно-плазменного синтеза покрытий.

Полученные результаты доказывают, что планарный магнетронный и ВЧ индукционный разряды по целому ряду параметров – энергетической эффективности, диапазону рабочего давления, простоте реализации устройств с различными геометрическими размерами, - и возможностью комбинирования с дополнительными электрическими и магнитными полями, являются оптимальными для разработки ионно-плазменного технологического оборудования.

На базе комбинированного индукционно-емкостного разряда с асимметричными электродами разработаны источники взаимокompенсирующих потоков низкоэнергетичных ионов и электронов для технологий РИЛТ и РИПТ.

Комбинированный индукционно-магнетронный разряд продемонстрировал высокую эффективность при реализации технологий реактивного ионно-плазменного синтеза сложнокомпозиционных покрытий.

**Ключевые слова:** ионный пучок, источник ионов, магнетронный разряд, низкотемпературная плазма, ионно-плазменные системы, газовый разряд в магнитном поле.