

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Зикова Олександра Володимировича «Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітними полями», що подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Актуальність теми представленої дисертаційної роботи полягає в комплексних експериментальних і теоретичних дослідженнях процесів генерації і транспортування іонних потоків в газорозрядних плазмових системах різного типу з комбінованими електричними і магнітними полями, а саме: у планарному магнетронному розряді в прискорювальному і плазмовому режимах, ВЧ-індукційному розряді, а також в комбінованих ВЧ індукційно-ємнісному і ВЧ індукційно-магнетронному розрядах. Вивчення і визначення загальних закономірностей формування іонних потоків в цих системах представляє 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.

Дисертаційна робота виконана в рамках цілої низки фундаментальних та прикладних досліджень, які проводились в ХНУ імені В.Н. Каразіна протягом близько 25 років.

Таким чином, актуальність теми дисертації Зикова О.В., присвяченої проблемам генерації і транспортування іонних потоків для реалізації мікро- та нанотехнологій, не викликає сумніву.

Наукова новизна результатів, що отримано у дисертації, полягає в наступному:

- Вперше експериментально і теоретично встановлено, що виникнення газового розряду в магнітному полі має два різні механізми: стрибкоподібний *пробій* при сильному однорідному електричному полі в результаті розвитку електронних лавин та плавне, монотонне *запалювання* в слабкому чи неоднорідному електричному полі високоенергетичними електронами, захопленими в електромагнітну пастку.
- Вперше експериментально досліджена структура перехідної області (передшару) між іонно-пучковою плазмою та прианодним шаром електронів і розроблено дрейфову модель самоузгоджених станів планарного магнетронного розряду (ПМР) в прискорювальному режимі.
- Вперше експериментально встановлена і теоретично обґрунтована принципова роль первинних високоенергетичних електронів, що осцилюють в електромагнітній пастці, на запалювання і вольт-амперні характеристики ПМР в плазмовому режимі.
- Вперше визначено параметри подібності для розрядів з об'ємною іонізацією – ПМР в плазмовому режимі та ВЧ індукційного розряду.
- Вперше експериментально та теоретично доведено визначальний вплив температури плазмових електронів на вольт-амперні характеристики ПМР в плазмовому режимі.
- Вперше експериментально визначено та теоретично обґрунтовано границі застосування просторово усередненої моделі ВЧ індукційного розряду по тиску робочого газу.
- Вперше експериментально встановлена і теоретично обґрунтована принципова роль асиметрії електродів в енергобалансі ВЧ індукційно-ємнісного розряду.
- Вперше розроблена феноменологічна 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 і зовнішньої нейтралізації заряду потоків іонів, що генеруються різними типами джерел.
- Вперше проведена систематизація процесів генерації і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими ЕН полями на основі дрейфової теорії, визначені загальні параметри подібності і закономірності ППС на основі фундаментальних положень

фізики газового розряду, низькотемпературної плазми і законів збереження частинок, імпульсу і енергії.

Практичне та теоретичне значення здобутих результатів. Представлені в дисертаційній роботі фундаментальні дослідження плазмових систем з комбінованими ЕН полями проводилися паралельно з виконанням прикладних НДР і НДКР по розробці іонно-плазмового обладнання для обробки поверхні. Основна частина експериментальних досліджень проводилася 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 травлення і модифікації поверхні, нанесення і синтезу тонких плівок. Тому результати фізичних досліджень безпосередньо застосовувалися на практиці і дозволили розробити ряд оригінальних технічних рішень для оптимізації джерела низькоенергетичних іонів і способів обробки діелектричних поверхонь, захищених патентами України.

Рівень обґрунтованості. Вірогідність наукових результатів та обґрунтованість положень і висновків дисертаційної роботи Зикова О.В. обумовлена використанням достатньо добре випробуваних експериментальних методів. Наведені в дисертації результати теоретичних розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними. Ряд висновків та оцінок у граничних випадках відповідають експериментальним та числовим результатам, які були здобуті раніше іншими авторами. Усі здобуті результати відповідають загальним положенням сучасної фізики плазми та фізики газового розряду.

Основні наукові публікації. За результатами дослідження опубліковано 24 наукові праці: 20 статей у фахових виданнях України, 4 статті у іноземних фахових виданнях. Перераховані публікації достатньо повно відображають запропоновані в дисертації теоретичні та практичні рішення. Наведені публікації відповідають темі дисертації і повно відображають її зміст. З робіт, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані тільки ті результати, які було одержано автором особисто.

Структура та зміст дисертації. Повний обсяг дисертації становить 312 сторінок. Текст дисертації складається з вступу, семи розділів основного тексту з 184 рисунками, висновків, одного додатку і списку літератури з 265 джерел.

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.

Перший розділ роботи присвячено питанню виникнення газового розряду в пристроях з постійними схрещеними ЕН полями. 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. В розділі представлені детальний опис експериментального обладнання, методик досліджень і результати вимірювань процесів виникнення та згасання розряду.

Представлені феноменологічні моделі процесів *запалювання* та *пробою* розряду, які відрізняються фізичним механізмом, та отримані аналітичні рівняння для кривих запалювання та пробою розрядного проміжку. Проведено порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками і зроблені висновки, що різноманітність кривих виникнення розряду в магнітному полі, яка спостерігалася в експериментах, визначається існуванням двох механізмів посилення первинних γ -електронів, відмінністю величини γ_{eff} та неоднорідністю електричного поля..

У **другому розділі** дисертаційної роботи наведені результати досліджень прискорювального режиму планарного магнетронного розряду, при якому генеруються іони з енергією $\varepsilon_i = (1-3)$ кеВ. Проведено огляд літератури, представлені опис діагностичного стенду, методик вимірювань і результати експериментальних досліджень інтегральних характеристик планарного магнетронного розряду в широкому діапазоні зовнішніх параметрів: розрядної напруги, індукції магнітного поля, тиску робочого газу.

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 і в анодному шарі з сильним електричним полем, коли розвиваються електронні лавини. Проведено порівняльний аналіз експериментальних даних з теоретичними розрахунками і зроблені висновки про добру 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.

Проведено огляд науково-технічної літератури про газорозрядні характеристики ПМР, 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. Приведено опис магнетрона із змінною геометрією силових ліній магнітного поля для експериментальних досліджень цього питання та результати вимірювань порогу згасання розряду від розмірів іонізаційної пастки.

Для пояснення здобутих експериментальних даних було розроблено просторово-усереднену модель ПМР. 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. Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень проведено в кінці розділу. На основі аналізу зроблені висновки про механізм планарного магнетронного розряду в плазмовому режимі.

У *розділі 4* представлені результати досліджень процесу генерації потоку низькоенергетичних іонів у ВЧ індукційному розряді. Наведено огляд літератури, сформульовані завдання досліджень, представлено опис експериментального устаткування і методів дослідження. 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 і розподіли густини струму іонів, температури електронів і потенціалу плазми залежно від параметрів системи, визначені параметри подібності.

Розглянуто просторово усереднену модель ВЧІ розряду на базі рівняння балансу частинок та знайдені рівноважні значення температури електронів залежно від параметра подібності. Визначені умови її використання та знайдені пороги запалення розряду від тиску робочого газу.

Проведено порівняння результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними.

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.

Наведено огляд літератури, присвяченої питанням фізики ВЧ ємнісного розряду, зокрема, ВЧ діодному ефекту. Сформульовані завдання експериментальних і теоретичних досліджень.

Експериментальні дослідження ВЧІЄ розряду проводилися в одно сітковому джерелі іонів низької енергії, для якого досліджені інтегральні характеристики ВЧІЄ розряду в діапазоні тиску $p < 10$ мТорр, коли самостійний розряд ВЧІЄ не запалюється.

Сформульовано модель енергетичного балансу іонів у асиметричному ВЧІЄ розряді. Для моделі були проведені розрахунки розподілу потоків енергії на електроди системи.

Найбільш цікавим результатом є наявність максимуму нормованої ВЧ потужності, що вкладається в прискорення іонів на електрод з меншою площею. Таким чином, було продемонстровано, що асиметрія площ ВЧ електродів має принципове значення в енергобалансі комбінованого ВЧІС розряду і впливає на величину сумарної енергетичної ціни іона та енергетичну ефективність плазмових реакторів і джерел іонів на базі комбінованого ВЧІС розряду.

Також було досліджено комбінований ВЧ індукційно-магнетронний розряд, який використовується в магнетронних розпорозувальних системах (МРС) для додаткової іонізації газу і розпорозених атомів та для забезпечення роботи МРС при зниженому тиску робочого газу.

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 та виділити три діапазони тиску робочого газу, що відрізняються режимами з пріоритетом індукційного або магнетронного розряду.

Розділ 6 присвячений дослідженням зарядової і струмової нейтралізації низькоенергетичних іонних пучків у ІПС з джерелами іонів різних типів.

Для всіх конструкцій наведено опис експериментальних установок, методик досліджень основних параметрів ІПП-потенціалу плазми, швидкості утворення електронів, їх ФРЕ. Експериментально було встановлено, що значення потенціалу іонно-пучкової плазми φ_{pl} , тобто стала рівноважна глибина потенційної ями для електронів, істотно залежить від коефіцієнта вторинної іон-електронної емісії матеріалу мішені γ .

Розглянуто просторово-усереднену феноменологічну модель іонно-пучкової плазми, побудовану на основі енергобалансу заряджених частинок. Аналіз показав, що сукупність процесів, що відбуваються в іонно-пучковій плазмі можна охарактеризувати як несамостійний безелектродний газовий розряд низького тиску.

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.

Визначено загальні для всіх моделей параметри подібності і нормування фізичних величин у дрейфовій теорії ІПС з ЕН полями.

Зроблено висновок, 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.

Основні результати дисертаційної роботи. 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 розпорозених атомів. Застосовуючи різні комбінації потенціального електричного поля (постійного, височастотного, 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.

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 РІПТ і РІПС. 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.

Зауваження до роботи.

1. Немає чіткої постановки задачі у розділі 2 на сторінці 94. Необхідно сформулювати: в зв'язку із переліченими нерозв'язаними проблемами в дисертації поставлені такі задачі.
2. Не всі скорочення внесені до списку скорочень. Наприклад, *ІОС*, *ВЧІЕ* та ін.
3. Не всі рисунки виконані в єдиному форматі, крім того, не скрізь проставлені „довірчі” інтервали (похибки) на залежностях.
4. Більшість рисунків має займати 1/3 сторінки, однак вони більші, тому ці сторінки не повинні враховуватися..

Однак, вказані зауваження не знижують цінності дисертації.

Відповідність дисертації встановленим вимогам та оцінка в цілому. Дисертаційну роботу Зикова О.В. виконано на високому рівні. Ця робота є завершеною науковою працею. В ній здобуто нові наукові результати, що розв'язують актуальну проблему генерації і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітним полями. Автореферат повністю відображає зміст дисертації. Мова і стиль дисертаційної роботи та автореферату Зикова О.В. відповідають існуючим вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Зикова О.В. «Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітним полями» повністю відповідає всім вимогам Атестаційної колегії МОН України до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри наноелектроніки,
Сумського державного університету

Підпис проф. Погребняка О.Д. засвідчено
Секретар Вченої ради
Сумського державного університету



А. Погребняк
Погребняк О. Д.

А. І. Рубан
Рубан А.І.