

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Зикова Олександра Володимировича

«Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітними полями»,
представленої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Дисертаційна робота О.В. Зикова присвячена дослідженню фізичних властивостей плазми 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. Дисертаційна робота виконана в рамках низки фундаментальних та прикладних досліджень, які проводились в ХНУ імені В.Н. Каразіна протягом близько 25 років.

Актуальність теми обумовлена важливим місцем таких плазмових систем в чисельних технологічних застосуваннях при розробках нової генерації іонно-плазмового обладнання для мікро- і нанотехнологій, зокрема, установок іонно-плазмового травлення навіпровідникових матеріалів, кластерних плазмових систем для синтезу та обробки наноструктур, іонно-плазмового осадження функціональних нанокompatитних покриттів тощо. Таким чином, актуальність теми дисертації Зикова О.В., присвяченої проблемам генерації і транспортування іонних потоків для подальшого розвитку мікро- та нанотехнологій, не викликає сумніву.

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

- Вперше проведено систематизацію процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах із комбінованими ЕН полями, визначені загальні параметри подібності та закономірності ІПС;

- 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, або ж плавне, монотонне запалювання в слабкому чи неоднорідному електричному полі високоенергетичними електронами, які є захопленими в електромагнітну пастку;
- 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;
- 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.

Практичне та теоретичне значення здобутих результатів.

Результати дисертаційної роботи вже отримали промислове застосування і практичне використання, зокрема в наступному:

1. Іонно-плазмове 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.

Теоретичні дослідження автора призвели до 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.

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. Особистий внесок дисертанта в роботи, виконані зі співавторами, точно і детально відображений у дисертації та авторефераті.

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 ініціювання газового розряду в пристроях з постійними схрещеними ЕН полями. Найбільш вагомими результатами, що наведені в даному розділі, на мою думку, є запропонований автором дрейфовий механізм для пояснення виникнення газового розряду на основі теорії Таундсенда, що адаптована до розряду в магнітному полі, та отримані аналітичні вирази сумарної енергетичної ціни іонів для електронів з різною функцією розподілу за енергією і коефіцієнту іонізації для випадків нерівноважних та моно енергетичних електронів в електричному полі.

У *другому розділі* дисертаційної роботи наведені результати досліджень прискорювального режиму планарного магнетронного розряду, при якому генеруються іони з енергією $\varepsilon_i = (1-3)$ кеВ. 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. О.В. Зиковим 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 детально розглянуто плазмовий режим планарного магнетронного розряду, при якому генеруються іони з енергією $\varepsilon_i = (0,5-1)$ кеВ. Автором, зокрема, показано, що рівноважна температура електронів і границя існування плазмового режиму магнетронного розряду, а також поріг згасання по тиску робочого газу визначаються параметрами подібності $n_a d_i$ і δ . Температура електронів і параметр $n_a d$ визначають також співвідношення струмів іонів, що народилися в результаті іонізації *os*- і *p*-електронами, і сумарну енергетичну ціну іона η_{Σ} .

У *розділі чотири* представлені результати досліджень процесу генерації потоку низькоенергетичних іонів у ВЧ індукційному розряді. Для цих

досліджень автором були залучені 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. Особливо заслуговують на відзнаку 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, а також побудована модель опису ВЧІ розряду при високому тиску.

Розділ п'ять 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. сформульовано модель енергетичного балансу іонів у асиметричному ВЧІЄ розряді. Автором були проведені розрахунки розподілу потоків енергії на електроди системи. Найбільш цікавим результатом таких розрахунків є наявність максимуму нормованої ВЧ потужності $p_l = P_l/P_0$ (P_0 – сумарна ВЧ потужність), що вкладається в прискорення іонів на електрод з меншою площею

Розділ шість присвячений дослідженням зарядової і струмової нейтралізації низькоенергетичних іонних пучків у ІПС з джерелами іонів різних типів. На особливу відзнаку заслуговують дослідження ФРЕЕ, які показали, що її характерною рисою є наявність трьох груп електронів: низькотемпературного максвелівського 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⁻³; групи γ -електронів, енергія яких перевищує $e\phi_{pl}$ на величину початкової енергії γ -електронів $\sim (2-5)$ еВ, а густина складає $\sim 10^5$ см⁻³ та деякої "проміжної" немаксвеллової групи, густина і форма якої може мінятися в широких межах. Даний результат особливо цікавий та вагомий в контексті деякої можливої аналогії з існуванням подібних груп електронів а Холівських плазмових системах (УЗДП, УАС і т.д.), де також спостерігалась різниця для ФРЕЕ та

існування трьох груп електронів в різних областях розряду (до речі також в схрещених $E \times H$ полях). Представляється важливим подальший детальний аналіз еволюції функції розподілу електронів за енергіями в різних областях розряду, тобто просторової локалізації різних груп електронів

У розділі сім розглянуто загальні закономірності та відмінності іонно-плазмових систем із різними комбінаціями EH полів на основі порівняння оригінальних моделей ПС, розроблених у дисертаційній роботі. На підставі аналізу автором дисертації, зокрема, побудовано узагальнюючу діаграму існування різних режимів ПМР залежно від температури електронів, тиску робочого газу і геометричних розмірів. Також розраховані ватт- і вольт-амперні характеристики ВЧ індукційного та магнетронного розрядів у плазмовому режимі та побудовано узагальнені вольт-амперні характеристики ПС.

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

У Додатку А представлені приклади практичної реалізації результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертаційної роботи.

До головних достоїнств даної роботи перш за все необхідно віднести те, що дисертація має яскраво виражений комплексний характер і вдало об'єднує фундаментальні і прикладні аспекти. Вона також гармонічно поєднує в собі результати як експериментальних досліджень, так і теоретичних розрахунків, що виконані автором.

Автором дисертаційної роботи одержано оригінальні наукові результати, які роблять істотний внесок в розуміння фізики процесів в плазмових системах із схрещеними полями, серед яких, на мій погляд, особливо слід виділити наступне:

- побудову діаграми станів стаціонарних та перехідних режимів планарного магнетронного розряду;

- включення «передшару» до опису процесів в таких системах є суттєвим прогресом в розвитку теорії Жарінова;
- автором введено також вільну границю, що дозволило змінювати густину та інші параметри в широких межах;
- також вперше вдалося зшити передшар і шар в теоретичній інтерпретації;
- проведені порівняння Global model та 2-D fluid model а також зшивка цих двох моделей;
- 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;
- експериментально і теоретично доведено зміну рівноважної температури плазмових електронів у ПМР внаслідок існування групи високоенергетичних електронів, густина яких залежить від питомої потужності в розряді.
- вперше досліджено комбіновані ВЧ, індукційно-магнетронні та індукційно-ємнісні розряди, що створює умови для подальшого розвитку майбутніх іонно-плазмових технологій на основі комбінації та суперпозиції різних типів розрядів. Така суперпозиція може в подальшому призвести до отримання якісно нових ефектів при взаємодії плазми з поверхнями за рахунок синергії фізичних процесів при комбінованому плазмовому впливі та до розвитку новітніх плазмових технологій на цій основі.

Необхідно підкреслити, що результати дисертаційної роботи отримані в рамках чітко поставлених задач із застосуванням адекватних засобів досліджень. Усі розділи є взаємопов'язані і спрямовані на вирішення поставленої проблеми та задач дисертації.

Разом із безперечно вагомими здобутками і важливими фізичними результатами робота має і деякі недоліки, серед яких слід зауважити наступне:

1. Результати досліджень кривих пробою потребують більш детальних додаткових обговорень та аналізу. Особливо це стосується областей, де виникає досить суттєва невизначеність напруги пробою (вертикальна ділянка кривої) або ж у випадку існування декількох значень напруги пробою.

2. В ряді випадків, при проведенні експериментальних вимірювань бажано б було залучити більш широке коло діагностик для вивчення параметрів плазми в розрядах, що досліджуються. Так, наприклад, було би безперечно доцільним залучення більш точних безконтактних методів вимірювань (спектроскопія, інтерферометрія та ін.), хоча би для окремих контрольних вимірювань. Особливо це стосується компактних плазмових систем та приелектродних зон, де зонди можуть вносити відповідні збурення та похибки тощо.

3. Доречно б було приділити більше уваги коливанням, що спостерігались, та провести ґрунтовні дослідження т.з. «шумів», особливо в плазмовому режимі роботи магнетрону.

4. На основі зондових вимірювань поблизу катоду в роботі робиться важливий висновок щодо потоку електронів з «перед шару» на катод, який потребує більш ретельної інтерпретації та аналізу.

5. Є також ряд зауважень до тексту і оформлення дисертації. Розділи є суттєво різні за своєю структуризацією. У Висновках, на мою думку, більшу увагу варто було би приділити узагальненню отриманих результатів. Термін «плазмометр» не є взагалі вдалим, більш доцільним і точним є «ВАХометр». Також «інтегральна модель» більш точно описує сутність запропонованої автором теоретичної інтерпретації, ніж використаний термін «просторово усереднена модель», оскільки просторовий параметр d як раз і означає в залежності від випадку зовсім різне: або ж відстань між електродами, або розмір зони уходу іонів.

6. На переважній більшості рисунків, що відображають експериментальні результати, відсутні довірчі інтервали, та не обговорюються похибки вимірювань, які для аналізу деяких отриманих результатів є принциповими. Так, на кривих пробою для малих полів є досить різка залежність, тому «вуси» є необхідними, або ж залежність тиску, при якому відбувається підпал, від струму зовнішнього соленоїда і т.д.

Разом із тим, наведені зауваження не стосуються основних положень, що виносяться на захист, не можуть вплинути на загальну високу оцінку дисертаційної роботи та не змінюють позитивної думки про наукову обґрунтованість і вірогідність положень і висновків дисертації.

Наведені зауваження також не ставлять під сумнів достовірність та цінність одержаних в дисертації результатів, а скоріше свідчать про доцільність подальших експериментальних та теоретичних досліджень новітніх технологічних плазмових систем з комбінованими електричними і магнітними полями.

Відповідність дисертації встановленим вимогам та оцінка в цілому:

Таким чином, ґрунтуючись на приведеній вище оцінці дисертаційної роботи, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Зикова О.В. виконана на високому науковому рівні і 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.

Дисертаційна робота і автореферат написані грамотною науковою мовою та містять чітке формулювання поставленої задачі та висновків. В авторефераті повністю розкрито основні результати й положення, що виносяться на захист, та вірно відображено зміст дисертаційної роботи.

В цілому, треба відзначити, що дисертаційна робота О.В. Зикова суттєво доповнює сучасні уявлення про динаміку плазми в схрещених електричних і магнітних полях, формування іонних потоків в плазмових технологічних

системах та взаємозв'язок параметрів плазми і процесів взаємодії плазми з матеріалами.

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, безперечно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Офіційний опонент,
директор Інституту фізики плазми
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор

I. С. Гаркуша

“ 04 ” січня 2017 р.

Підпис члена-кореспондента НАН України
д.ф.-м.н., проф. Гаркуші І.С. засвідчую
Учений секретар ННЦ ХФТІ, к. ф.-м.н.



О.В. Волобуєв