

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ромашенко Олени Володимирівни

«Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах»

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Дисертація присвячена аналітичному дослідженню та числовому моделюванню заряджання макрочастинок у плазмі з електронним пучком, енергетичного обміну між макрочастинками та плазмою з пучком електронів, фазових станів макрочастинок у пучково-плазмових технологічних системах осадження тонких плівок та плазмових іммерсійних іонних імплантаторах. У дисертації досліджені методи очищення плазми від макрочастинок без застосування магнітних фільтрів.

Технології з використанням пучків заряджених частинок вже давно розробляють і широко впроваджують. Тому дисертація Олени Володимирівни є безумовно актуальною. Дисертація також важлива тому, що макрочастинки потоку дугової плазми перешкоджають технологічним застосуванням, і є значна потреба в розв'язуванні задач, що стосуються поведінки макрочастинок в потоці дугової плазми. Необхідна розробка фундаментального наукового підґрунтя розвитку, побудови та оптимізації реальних пристроїв з поліпшеними характеристиками та обумовлена ще невикористаними можливостями і перспективами застосування таких систем, а також можливістю створення новітніх інноваційних пристроїв, і тому ця дисертація має велике практичне значення. У зв'язку з цим у дисертації досліджено динаміку та стани макрочастинок у пучково-плазмових системах.

Проведені аналітичні дослідження виконано у комплексі з числовим моделюванням, а результати порівняно з результатами експериментальних досліджень.

Основний зміст дисертаційної роботи складається із вступу, шість розділів, висновків та додатків.

У **вступі** обґрунтована актуальність досліджень та результатів, сформульовані мета та задачі дисертації, продемонстровано наукове і практичне значення, аргументована новизна результатів, зв'язок з завданнями, плановими темами, підкреслено особистий внесок здобувача, перераховані публікації та апробація результатів.

Розділ 1 присвячено аналізу емісії макрочастинок у вакуумно-дуговому розряді, огляду теорій емісії макрочастинок, наведенню даних експериментів, особливостям заряджання макрочастинок, динаміці макрочастинок, методам видалення макрочастинок з плазмового потоку за допомогою магнітних фільтрів, обговоренню альтернативних методів зменшення забруднень покриттів макрочастинками без застосування магнітних фільтрів.

У **розділі 2** розглянуто механізми заряджання макрочастинок, енергообмін, випаровування та руйнування макрочастинок у присутності пучка електронів.

У розділі 3 розглянуто динаміка та фазові стани макрочастинок у плазмі дугового розряду залежно від плазмових параметрів, пояснення відсутності макрочастинок на осаджених поверхнях покриттів.

Розділ 4 присвячений дослідженню впливу потенціалу зсуву підкладки на макрочастинок, заряджання та динаміки макрочастинок у приповерхневому плазмовому шарі при використанні постійного та імпульсного негативних потенціалів.

У розділі 5 дисертації проаналізовано вплив реакційного газу на динаміку та фазові стани макрочастинок у плазмі дугового розряду, пояснено зменшення числа макрочастинок у дуговому розряді у присутності реакційного газу, розроблено моделі заряджання та динаміки макрочастинок у двох ділянках дугового розряду: у розрядному проміжку та у шарі просторового заряду.

Розділ 6 присвячено дослідженню заряджання та руху макрочастинок у дугових джерелах плазми при використанні магнітних фільтрів.

В кінці дисертації після шостого розділу наводяться загальні висновки за дисертаційну роботу в цілому, які підтверджують досягнення мети роботи і виконання поставлених завдань.

У додатках наведено повний список публікацій за темою дисертації та дані про впровадження результатів дисертації.

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи не викликають сумніву, оскільки забезпечуються коректним вибором аналітичних та числових математичних методів, співставленням аналітичних результатів та результатів числового моделювання та порівнянням з результатами експериментальних досліджень.

Основні результати дисертації опубліковано у 27 наукових працях, що відповідають вимогам, у тому числі 14 статей у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 3 статті в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 5 публікацій у фахових виданнях України, що додатково відображають наукові результати дисертації, та 5 тез доповідей на міжнародних фахових наукових конференціях.

Найвагомішими та достовірними результатами, які характеризують наукову новизну роботи і особистий внесок авторки, можна вважати такі:

1. Побудовано теоретичну модель енергетичного обміну макрочастинок з плазмою та з пучками заряджених частинок з урахуванням емісійних процесів.
2. При дослідженні термоелектронної емісії та автоелектронної емісії встановлено, що автоелектронна емісія не призводить до зміни знаку потенціалу макрочастинок на протилежний.
3. Показано, що для руйнування макрочастинок у плазмі з більшою концентрацією потрібні потужніші пучки, ніж у плазмі з меншою концентрацією.
4. Залежно від розмірів макрочастинок поділені на групи: при початковому розмірі макрочастинок $D > D_{кр1}$ макрочастинок охолоджуються та досягають

підкладки у твердому стані; при $D_{кр2} < D < D_{кр1}$ макрочастинки нагріваються до рівноважної температури; при $D < D_{кр2}$ макрочастинки досягають температури кипіння та можуть бути випареними.

5. Показано, що позбавлення макрочастинок від надлишкового заряду відбувається шляхом релеєвого розпаду її на частини або внаслідок термо-автоелектронної емісії.
6. Показано, що повне випаровування макрочастинок у низькотемпературній плазмі за типових умов газового розряду за температури, меншої за температуру кипіння, є неможливим.
7. Встановлено, що внесок до нагрівання макрочастинок від багатозарядних іонів є більшим, ніж від однозарядних.
8. Показано, що для великих макрочастинок час нагрівання є великим, а час руйнування, навпаки, малим. Це дає можливість припустити, що за концентрації плазми $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$ через деякий час макрочастинка охолоне до температури, нижчою за температуру плавлення, та до підкладки титанові макрочастинки наблизяться у твердому стані.
9. Здобуто залежність часу повного випаровування купрумної макрочастинок від концентрації плазми.
10. Продемонстровано, що макрочастинку можна утримати у плазмі дугового розряду за наявності реакційного газу низького тиску, завдяки балансу сили тертя з боку нейтралів, сили йонного захоплення та електростатичної сили.
11. Показано, що присутність газу нітрогену у камері дугового розряду призводить до охолодження макрочастинок, внаслідок чого макрочастинки надходять до підкладки у твердому стані.
12. Здобуто аналітичний вираз для функції розподілу макрочастинок за зарядами у плазмі з електронним пучком з урахуванням вторинної електронної емісії.

До змісту дисертації є такі зауваження:

1. Так як потік дугової плазми формується катодними плямами, які рухаються по поверхні, то добре б ще вказати ступінь азимутальної несиметричності потоку.
2. При аналізі шляхів зменшення та запобігання забруднення поверхонь та покриттів макрочастинок, не згадано такий відомий спосіб, як використання ВЧ поля.
3. Не вказано, які програми використовувалися для моделювання та розрахунків.
4. Не заважало би врахувати ефект релаксації моноенергетичного пучка на різних глибинах плазми і перетворення його в розмитий. При наявності пучка електронів в типових умовах може розвиватися пучково-плазмова нестійкість збудження турбулентності. Цікаво б знати, які параметри треба використовувати, щоб пристрої виконували свою функцію в умовах збудження турбулентності. Також нерівноважність може визначатися не тільки пучком електронів, а ще й наявністю відносного потоку плазми і заряджених макрочастинок.
5. На жаль, іноді зустрічаються описки та граматичні помилки, наприклад:

прізвище Е.В.Ромаш-ченко розділено на 2 частини рисою.

6. Використовується як "Чисельне" так і "Числове".

7. В десяткових дробах використовується точка замість коми.

8. Зустрічаються помилки друку в авторефераті: На ст. 25 автореферату треба замінити фразу «Проходження макрочастинок крізь магнітний фільтр ...» на «Проходження макрочастинок крізь магнітний фільтр ...»; на ст. 8 два рази поспіль використана фраза «концентрація електронного пучка $n_b=10^{15}\text{м}^{-3}$ »

Але ці зауваження не ставлять під сумнів достовірність та практичну цінність одержаних в дисертації результатів, не впливають на в цілому дуже позитивну оцінку роботи і, можна сподіватись, понукають авторку врахувати їх у своїх подальших дослідженнях.

Аналіз матеріалів дисертації дозволяє зробити висновок, що в ній розв'язано важливу наукову як фундаментальну, так і прикладну проблему.

Аналіз змісту дисертації дозволяє зробити висновок о повній завершеності роботи. Вона оформлена згідно існуючих вимог.

Стиль викладення та мова дисертації є чіткими та зрозумілими. Текст написано послідовно із логічним зв'язком між розділами і підрозділами. Гарному розумінню суті сприяє достатня кількість ілюстративного матеріалу.

Автореферат дисертації правильно та з достатньою повнотою відображає матеріали дисертаційної роботи, основні результати та висновки, ступінь їх наукової значимості і новизни. Основні положення дисертації та зміст автореферату повністю ідентичні і відповідають паспорту спеціальності 01.04.08 – "фізика плазми".

На основі проведеного вище аналізу вважаю, що дисертаційна робота Ромащенко Олени Володимирівни «Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах» цілком задовольняє усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», які висуваються до докторських дисертацій, а її авторка заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

начальник лабораторії
ІПЕНМП ННЦ ХФТІ НАН України
доктор фіз.-мат. наук, професор

В.І.Маслов

ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар
ІННЦ ХФТІ

27.04

04

