ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Ромащенко Олени Володимирівни
«Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Дисертаційну роботу Ромащенко О. В. присвячено теоретичному дослідженню та числовому моделюванню динаміки та фазових станів макрочастинок (МЧ) у пучково-плазмових системах, які широко використовують для модифікації властивостей матеріалів і плазмової обробки поверхонь. Тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки наявність макрочастинок у пучково-плазмових системах є істотною перешкодою для багатьох технологічних застосувань, зокрема, для вакуумно-дугового осадження тонких плівок і плазмової імерсійної іонної імплантації. Для видалення макрочастинок з потоку вакуумно-дугової плазми часто використовують магнітні фільтри різноманітної конфігурації. Проте, застосування магнітних фільтрів призводить до суттєвого зниження продуктивності технологічного процесу, тому протягом останніх десятиріч набувають все більшого поширення альтернативні методи позбавлення від макрочастинок.

Дисертаційну роботу виконано в навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт. Дисертантка розв'язала низку задач, що мають фундаментальний і прикладний характер. Здобуті результати роботи є цікавими у науковому відношенні та корисними для практичного застосування.

Структура та зміст дисертації. Дисертаційну роботу побудовано згідно вимогам, що висувають до оформлення дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 323 сторінки, з них 265 сторінок основного тексту. Дисертаційна робота містить 80 рисунків і 4 таблиці. Список використаних джерел містить 278 найменувань на 28 сторінках.

У **вступі** міститься короткий огляд сучасного стану наукових проблем, які досліджено в дисертації. Обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та основні задачі дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення здобутих результатів, наведено зв'язок досліджень за темою дисертації з науковими програмами, підкреслено

особистий внесок автора в дисертаційну роботу, підтверджено апробацію матеріалів дисертації, результати якої були представлені на міжнародних конференціях з фізики плазми.

У **першому розділі** на основі літературних джерел проаналізовано особливості емісії МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду. Проведено огляд основних теорій емісії МЧ, які ґрунтуються на принципі формування ерозійних кратерів на поверхні катоду. Наведено дані експериментальних робіт щодо функцій розподілу МЧ за розмірами, кутами та швидкостями. Розглянуто особливості заряджання МЧ у плазмі, а також динаміку МЧ у плазмі та взаємодію МЧ з плазмою. Проведено огляд основних моделей заряджання МЧ на підставі теорії електростатичних зондів і проаналізовано межі їхнього застосування.

Проаналізовано методи видалення МЧ з плазмового потоку за допомогою різних магнітних фільтрів. Обговорено альтернативні засоби зменшення забруднень МЧ покриттів без застосування магнітних фільтрів. На підставі цього аналізу визначено, які методи придушення емісії МЧ є перспективними для очищення лабораторної та технологічної плазми та потребують подальшого вивчення.

У висновках до розділу 1 сформульовано питання, що залишилися невисвітленими у попередніх роботах.

У другому розділі дисертації розглянуто фізичні механізми заряджання МЧ у плазмових системах у присутності низькоенергетичного пучка електронів з енергією до 10 кеВ та густиною струму до декількох кА/см^2. Детально вивчено вплив різних процесів електронної емісії на заряджання МЧ у плазмі з електронним пучком. Зокрема, розглянуто вплив вторинної електрон-електронної емісії на МЧ, що безпосередньо зумовлена бомбардуванням поверхні МЧ електронним пучком. Крім того, у відповідності до поставленої задачі додатково розглянуто вплив термоелектронної, авто-електронної та термо-автоелектронної емісій. Визначено вплив кожної з цих емісій окремо на заряджання МЧ. Досліджено заряджання МЧ у плазмових системах з електронним пучком у класичному наближенні обмеженого орбітального руху та на підставі дискретної моделі. Досліджено флуктуації заряду МЧ у плазмових системах у присутності електронного пучка, що пов'язані з випадковістю процесу заряджання. Досліджено процеси обміну енергією між МЧ та електронно-пучковою плазмою. Розглянуто можливість випаровування та руйнування МЧ електронним пучком. Також досліджено можливість випаровування МЧ у пучково-плазмовому розряді з гарячими електронами, що мають температуру 10÷100 еВ.

У **третьому розділі** досліджено динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду залежно від плазмових параметрів.

Проаналізовано плазмові умови, за яких можливе нагрівання, охолодження та випаровування МЧ. Запропоновано пояснення відсутності МЧ на осаджених поверхнях покриттів при потужнострумовому імпульсному дуговому режимі роботи планарної магнетронної розпилювальної системи. Проаналізовано вплив зарядового стану та енергії йонів на потенціал та температуру МЧ. Досліджено можливість розпорошення МЧ іонним пучком.

У **четвертому розділі** досліджено вплив потенціалу зсуву підкладки на МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду. Розглянуто заряджання та динаміку МЧ у приповерхневому плазмовому шарі при докладанні до підкладки постійного та імпульсного негативних потенціалів зсуву. Дослідження проведено за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок і плазмовій імерсійній іонній імплантації. Слід відзначити побудовані здобувачкою теоретичні моделі. Для опису заряджання МЧ у плазмовому шарі побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є модель плазмового шару та модель заряджання МЧ на основі теорії обмеженого орбітального руху. У випадку постійного потенціалу зсуву підкладки використано стаціонарну модель плазмового шару, а у випадку імпульсного потенціалу зсуву – змінну з часом модель. У випадку низькоенергетичної плазмової імерсійної іонної імплантації з імпульсами довгої тривалості припущено, що плазмовий шар є стаціонарним.

Заряджання МЧ у приповерхневому плазмовому шарі досліджено з урахуванням як емісійних процесів з поверхні МЧ, так і вторинної іон-електронної емісії з підкладки, що виникає внаслідок бомбардування підкладки багатозарядними металевими йонами. Встановлено ролі потенціальної електронної емісії та кінетичної електронної емісії з підкладки з високим потенціалом зсуву на заряджання та динаміку МЧ у плазмовому шарі. Розраховано заряд МЧ залежно від положення МЧ усередині шару. Здобуто критерій відбиття МЧ від підкладки, що враховує вплив потенціалу зсуву підкладки. Якісно та кількісно описано фізичний механізм відбиття МЧ від підкладки. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з результатами попередніх експериментів, що показало добре узгодження між ними.

У випадку плазмової імерсійної іонної імплантації з короткими імпульсами (<10 мкс) розглянуто еволюцію заряду МЧ з часом. Досліджено динаміку заряджання МЧ як упродовж імпульсу, так і в інтервалі між імпульсами. Показано, що заряд і поведінка МЧ залежать від параметрів імпульсного потенціалу: тривалості імпульсу, періоду та амплітуди потенціалу.

У п'ятому розділі дисертації проаналізовано вплив реакційного газу на динаміку та фазові стани макрочастинки у плазмі вакуумно-дугового розряду. Запропоновано пояснення зменшення числа МЧ у вакуумно-дуговому розряді

у присутності реакційного газу нітрогену, який впливає на заряджання та динаміку МЧ в плазмі, а також на зменшення її температури. Слід відзначити побудовані здобувачкою для дослідження заряджання та динаміки МЧ комбіновані теоретичні моделі, які розроблені для двох ділянок вакуумно-дугового розряду: у розрядному проміжку та у шарі просторового заряду. Складниками теоретичної моделі є плазмово-хімічна модель, одновимірна модель гідродинаміки розрядного проміжку (або плазмового шару) та теорія заряджання обмеженого орбітального руху. Чисельне моделювання заряджання, динаміки та фазових станів МЧ у межах запропонованої теорії проведено на прикладі МЧ у плазмі вакуумної дуги з титановим катодом з робочим газом нітрогеном у діапазоні тисків 0.001÷1.3 Па.

У шостому розділі дисертації досліджено заряджання та рух МЧ у вакуумно-дугових джерелах плазми з криволінійним магнітним фільтром з урахуванням вторинної іон-електронної емісії з підкладки. Розглянуто вплив радіального електричного поля на рух МЧ у магнітному фільтрі. Визначено умови, за яких можливо проходження МЧ крізь магнітний фільтр.

У **Висновках** дисертантка чітко формулює основні результаті, що вперше здобуті у дисертації.

Результати дисертаційної роботи здобуті в рамках чітко сформульованих завдань. Зміст основних положень дисертаційної роботи, що винесено на захист, досить повно розкритий у відповідних розділах дисертації. Усі розділи є взаємопов'язаними та спрямованими на вирішення поставленого наукового завдання та проблем дисертації.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Здобуті результати, висновки та запропоновані на цій основі рекомендації є цілком обґрунтованими та достовірними. Для дослідження динаміки та фазових станів макрочастинок у пучково-плазмових системах дисертантка застосовувала адекватні теоретичні моделі, а також провела порівняння здобутих результатів з результатами попередніх експериментів. Основні результати роботи підтверджені та проілюстровані достатньою кількістю графіків і таблиць. Здобуті в дисертації наукові результати мають чітку фізичну інтерпретацію.

Здобуті результати пройшли апробацію на наукових семінарах і конференціях. Наукові статті, які покладені в основу дисертації, отримали позитивні рецензії від фахівців перед опублікуванням.

Дисертаційне дослідження **відповідає паспорту наукової спеціальності** 01.04.08 – фізика плазми.

Оцінка новизни наукових положень і результатів.

У дисертаційній роботі отримано низку нових, цікавих і практично важливих результатів, а саме:

1. Вперше теоретично досліджено динаміку макрочастинки у плазмі вакуумно-дугового розряду за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок і плазмовій імерсійній іонній імплантації; вакуумно-дуговому осадженню у присутності реакційного газу.

2. Вперше вивчено вплив параметрів технологічних процесів, таких як енергія та концентрація пучків, тиск газу азоту, потенціал зсуву на підкладці на динаміку та фазові стани макрочастинки у плазмі вакуумно-дугового розряду.

3. Вперше визначено вплив багатозарядних іонів на динаміку та фазові стани макрочастинки у плазмі вакуумно-дуговому розряду.

4. Вперше запропоновано пояснення зменшення числа макрочастинок у плазмовому приповерхневому шарі при докладанні до підкладки постійного та імпульсного негативних потенціалів зсуву. Для цього побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є модель плазмового шару та модель заряджання макрочастинки на основі теорії обмеженого орбітального руху. У випадку постійного потенціалу зсуву підкладки використано стаціонарну модель плазмового шару, а у випадку імпульсного потенціалу зсуву – змінну з часом модель.

5. Вперше запропоновано пояснення зменшення числа макрочастинок у вакуумно-дуговому розряді у присутності реакційного газу - нітрогену, що впливає на заряджання та динаміку макрочастинки в плазмі, а також на зменшення її температури. Для цього побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є плазмово-хімічна модель, гідродинамічна модель розрядного проміжку та модель заряджання на основі теорії обмеженого орбітального руху.

6. Вперше визначено роль вторинної іон-електронної емісії з підкладки у заряджанні та динаміці макрочастинки у плазмовому приповерхневому шарі. Показано, що коефіцієнт вторинної електронної емісії відіграє вирішальну роль у електростатичному відбитті макрочастинки від підкладки.

7. Вперше теоретично обґрунтовано можливість руйнування макрочастинки електронним пучком. Проаналізовано умови, за яких відбувається руйнування макрочастинки електронним пучком. Здобуто критерій електростатичного руйнування макрочастинки, що враховує енергію електронного пучка.

8. Вперше досліджено флуктуації заряду макрочастинки у плазмі з електронним пучком. Здобуто час релаксації заряду макрочастинки до рівноважного значення залежно від енергії електронного пучка.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь використання (впровадження). Здобуті в дисертаційній роботі результати роблять внесок у розвиток фізики плазми з пучками заряджених частинок та пилової плазми. Здобуті в дисертації наукові результати мають фундаментальний та практичний інтерес. Здобуті результати можна використовувати для контролю макрочастинок у плазмових технологіях, таких як вакуумно-дугове осадження тонких плівок та плазмова імерсійна іонна імплантація. Результати дослідження використано в освітньому процесі при розробці нових розділів лекційних курсів з дисциплін «Фізика газового розряду», «Сильнострумові пучки», «Динаміка пучків заряджених частинок та пучкові технології» для студентів кафедри прикладної фізики та фізики плазми Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Повнота викладення результатів дисертації в публікаціях. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 27 наукових працях, серед яких 22 статті у наукових фахових виданнях (у т. ч. з них14 статей у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, та 3 статті в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science) та 5 тез доповідей на міжнародних фахових наукових конференціях.

Кількість публікацій за темою дисертації є достатньою та відповідає вимогам МОН України щодо публікацій здобувачів наукового ступеня доктора наук.

Зауваження до дисертації.

1. У підрозділі 2.5 розглянуто питання розпаду МЧ під дією електронного пучка. У якості прикладу, проведено аналіз стійкості сильнозарядженої макрочастинки з купруму, яка перебуває у рідкому стані. Втім, у лабораторній чи технологічній плазмі існує розподіл макрочастинок за розмірами. Для наявності здобутих результатів не завадило б провести порівняння розподілу макрочастинок до опромінювання електронним пучком і після опромінювання електронним пучком певної енергії упродовж деякого часу.

2. На с. 102-103 проведено порівняння часу релаксації та дисперсії за наявності та відсутності електронного пучка, але відсутній вираз для дисперсії у присутності електронного пучка.

3. На с. 256-257 зроблено припущення, що йони на межі передшар-шар задовольняють узагальненому Ріманом критерію Бома, який був здобутий для випадку багатокомпонентної плазми без зіткнень. У тексті немає пояснень, чи будуть задовольняти цьому критерію йони у випадку плазми зі слабкими зіткненнями.

4. Не зовсім вдалим є скорочення ПІмІмІ, що означає плазмову

імерсійну імплантацію іонів, оскільки загально прийнятим є плазмова імерсійна іонна імплантація.

Проте зазначені вище недоліки не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи, виконаної на найвищому науковому рівні.

Висновок.

Дисертаційну роботу Ромащенко О. В. «Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах» виконано на високому науковому рівні. Вона є закінченою самостійною науковою роботою, в якій здобуто нові теоретичні результати, що можуть бути впроваджені у подальших теоретичних та експериментальних дослідженнях. За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною та практичною значимістю дисертаційна робота відповідає спеціальності 01.04.08 – фізика плазми. Автореферат повною мірою відбиває зміст дисертаційної роботи та містить основні результати та положення, що винесено на захист.

Дисертаційна робота Ромащенко О. В. «Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах» є цілісним науковим дослідженням, яке повністю відповідає встановленим вимогам чинного законодавства України. Вважаю, що Ромащенко Олена Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент,
доктор фіз.-мат. наук, с. н. с.
старший науковий співробітник
від. фізики плазми та плазмових технологій
Інституту ядерних досліджень НАН України, І. В. Літовко

Підпис І. В. Літовко засвідчую

Вчений секретар
ІЯД НАН України Н. Л. Дорошко

Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України
ІЯД НАН України
Ідентифікаційний код 23724640