

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

Макрочастинки є звичайною компонентою космічної, а часто і лабораторної плазми. Протягом останніх трьох десятиліть виконано чимало цікавих теоретичних і експериментальних досліджень з утворення порошинками кристалічних структур, їх плавлення, збудження колективних рухів, в яких вони беруть участь, тощо. Очевидно, для опису властивостей запорошеної плазми необхідно мати моделі досить складних процесів за участі макрочастинок. Найважливішими з них є заряджання та нагрівання макрочастинок, різні типи емісії з їхньої поверхні.

Особливу роль макрочастинок (далі будемо іменувати їх також *частинками*) відіграють в плазмових технологіях, зокрема з використанням іонних та електронних струменів та розрядів, що застосовуються для обробки поверхонь. Відомо, що такі частинки завжди утворюються у вакуумно-дуговому розряді, а їхня присутність шкодить якості осаджених на поверхню плівок. Тому нагальною потребою є пошук ефективних і простих методів позбавлення плазми від краплин і порошинок. Отже, тема дисертації, присвячена аналізу механізмів заряджання частинок, їх нагрівання, випаровування та руйнування, удосконаленню методів керування потоками частинок на поверхню, яку оброблюють за допомогою домішок газу та зовнішніх полів, є *актуальною*.

Дисертація добре структурована. У вступі подано необхідні відомості щодо актуальності теми, її зв'язку з науковими програмами, мети дослідження, новизни та практичного значення результатів, публікацій і особистого внеску, апробації робіт.

Основна частина дисертації починається з огляду механізмів утворення макрочастинок в плазмі вакуумно-дугового розряду, їхніх властивостей, процесів заряджання та нагрівання, а також шляхів очищення від них плазмового середовища. При обговоренні теоретичних моделей, запропонованих іншими дослідниками, приділено увагу питанням, що залишилися відкритими; вони будуть вивчатись в наступних розділах. Таким чином розкрито актуальність тематики і окреслено напрями досліджень дисертаційної роботи.

В *другому розділі* проаналізовано механізми заряджання частинок під дією струменя електронів низьких енергій (до 10 кеВ). Розглянуто обмін енергією між частинками та плазмою. Заряджання ізольованої частинки вивчено у наближенні обмеженого орбітального руху з урахуванням вторинної електрон-електронної емісії. Авторка розрахувала плаваючий потенціал та заряд двох типів частинок з високим і низьким коефіцієнтами електронної емісії, а також визначила функцію розподілу частинок за розміром та зарядами. Далі модель було розширено на *інші типи електронної емісії* з поверхні частинок – термоелектронна, автоелектронна, та термо-автоелектронна – були долучені до розгляду. При дослідженні нагрівання частинки в системі з електронним пучком знайдено залежність інтенсивності

випаровування від розмірів та властивостей речовини частинки і енергії електронного пучка. Знайдено умови розпаду частинки з великим зарядом через кулонове розштовхування.

Третій розділ присвячено вивченню еволюції параметрів макрочастинок та зміні агрегатних станів у плазмі *вакуумно-дугового розряду*. Тут було знайдено як змінюється з часом температура та маса крапель, проаналізовано умови нагрівання, охолодження та випаровування частинок. Показано, що розміри частинок можна віднести до трьох інтервалів. Частинки з першого інтервалу охолоджуються і осаджуються в твердому стані; з другого – нагріваються до рівноважної температури; з третього – досягають стадії кипіння та можуть випаровуватись. Також було проаналізовано вплив величини заряду та енергії іонів на потенціал і температуру частинок. Від заряду іонів залежить кінетична енергія, і, відповідно, характер взаємодії іонів з частинками. Розглянуто режими, коли відбувається вторинна іон-електронна емісія з поверхні частинок і їхнє розпорошення. Важливим результатом цього розділу є пояснення відсутності частинок на поверхні покриття, що наноситься в потужному імпульсному дуговому режимі роботи магнетронної розпилювальної системи.

У *четвертому розділі* вивчено вплив потенціалу підкладки на поведінку частинок у плазмі вакуумно-дугового розряду. Розглянуто заряджання частинок у *приповерхневому плазмовому шарі* при докладанні до підкладки постійного та імпульсного потенціалів зсуву, зроблено оцінку розмірів макрочастинок, а також інтенсивності їх осадження на підкладку. Дослідження проведено з огляду на такі технології обробки поверхонь як вакуумно-дугове осадження тонких плівок та плазмова іммерсійна іонна імплантація. Розрахунки виконано на основі моделі, що описує плазмовий приповерхневий шар, при цьому в ній враховано заряджання частинок. Вважається, що в плазмовому шарі знаходяться електрони, багатозарядні іони та вторинні електрони, емітовані з підкладки багатозарядними іонами. Заряджання частинок розглянуто у наближенні обмеженого орбітального руху. Знайдено критерій відбиття частинок від поверхні підкладки. В подальшому модель розвинуто для опису плазмової іммерсійної імплантації іонів, виконано числові розрахунки заряджання частинок при імпульсному потенціалі зсуву підкладки. Важливим результатом є виявлення можливості зменшити осадження макрочастинок на підкладку через зміну її потенціалу.

У наступному *п'ятому розділі* дисертації проаналізовано вплив *нітрогену в плазмі вакуумно-дугового розряду* на еволюцію їхніх параметрів та агрегатного стану. Було розроблено дві моделі часової еволюції параметрів частинки; одна з них для частинок, що знаходяться в розрядному проміжку вакуумно-дугового розряду, друга для частинок у приповерхневому шарі з некомпенсованим просторовим зарядом. У приповерхневому шарі, на відміну від розрядного проміжку, на заряджання частинок впливає наявне там електричне поле. На основі цих моделей виконано числове моделювання зміни параметрів частинки для вакуумної дуги з титановим катодом і робочим газом нітрогеном у діапазоні тисків $0.001 \div 1.3$ Па. Результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними. Дано пояснення зменшення числа частинок у присутності реакційного газу нітрогену. Показано, що нітроген у камері вакуумно-дугового розряду призводить до охолодження частинок і вони досягають підкладки у твердому стані

Шостий розділ присвячено дослідженню зміни параметрів макрочастинок у вакуумно-дугових джерелах плазми з *криволінійним магнітним фільтром*. Побудовано модель плазмових потоків у криволінійному магнітному фільтрі з урахуванням емісії вторинних

електронів з підкладки. Досліджено рух частинок у вакуумно-дугових джерелах плазми, що мають криволінійний магнітний фільтр з радіальним електричним полем. Визначено умови проходження частинок крізь такий фільтр. Результати розрахунків пояснюють спостережену в експериментах присутність частинок на виході з криволінійного плазмоводу.

Підсумовуючи скажемо, що авторка дисертації виконала різносторонні дослідження поведінки *макрочастинок в пучково-плазмових системах* і отримала низку *нових та вагомих* результатів. Особливо цікавими є запропоновані способи як зменшити потрапляння макрочастинок на покриття за допомогою інжекції електронного пучка, підвищення тиску нітрогену, докладання постійного, або імпульсного потенціалу зсуву до підкладки.

Водночас до роботи є такі зауваження:

1. В роботі розглядаються ізольовані макрочастинки. Але, якщо катод зроблено з легкоплавкого матеріалу, густина частинок може бути значною. Тому доцільно було би оцінити їхній взаємний вплив, а також їхній внесок в баланс зарядів іонів та електронів.
2. Екранування макрочастинок, коли йдеться про загальний випадок (огляд у вступній частині, підрозділ 1.2.1), не завжди відбувається згідно з формулою Дебая. В слабоіонізованій плазмі можливе розекранування порошинок, яке характеризується далекосяжним потенціалом, як це показано в роботах
I.L. Semenov, I.V. Krivtsun, A.G. Zagorodny. Numerical study of grain charging kinetics on the basis of BGK kinetic equation. Ukr. J. Phys. **56**, 138-143 (2011),
I.L. Semenov, S.A. Khrapak, H.M. Thomas. Approximate expression for the electric potential around an absorbing particle in isotropic collisionless plasma. Physics of Plasmas **22**, 053704 (2015).
3. Припущення в підрозділі 2.4, стор. 128 про існування детальної рівноваги є занадто сильним.
4. Доцільно було би пояснити чим обумовлений вибір конкретних параметрів плазми в тих випадках, коли результати розрахунків не порівнювались з експериментом.
5. На рис.2.4, стор. 90 подано немонотонну залежність плаваючого потенціалу вольфрамової МЧ від концентрації плазми. Також немонотонні залежності подані на рис. 3.10, стор. 184, рис. 6.2, стор. 276. Бажано було би детальніше обговорити причини такої немонотонної поведінки.
6. Є декілька зауважень стосовно термінів. Варто звернути увагу на неоднозначність терміну *фазові стани* макрочастинок. В залежності від контексту це може бути або агрегатний стан самої частинки, або стан системи багатьох частинок. Те саме можна сказати і про *температуру* макрочастинок.
Замість терміну *динаміка* частинок краще вживати *еволюція*, або *зміна параметрів в часі*, оскільки динаміка частинок в першу чергу асоціюється з їхнім рухом.
Замість терміну *марків* процес краще вживати *марковський*, оскільки назва його походить від прізвища Марков.
В авторефераті відсутня розшифровка аббревіатури ВДО (вакуумно-дугове осадження). В дисертації та авторефераті іноді зустрічаються помилки друку.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дисертація є закінченою роботою, виконаною самостійно на належному науковому рівні. Представлені результати є достовірними, вони отримані за допомогою апробованих методів, висновки та наукові положення чітко сформульовані та достатньо обґрунтовані. Поряд з результатами, важливими для дослідників запорошеної плазми в цілому, дисертація містить багато розрахунків, оцінок і висновків, які можуть сприяти покращенню технологій плазмової обробки поверхонь.

Результати дисертації повністю опубліковано у 22 статтях у фахових наукових виданнях, а також матеріалах конференцій. Автореферат дисертації достатньо повно відображає її зміст, основні результати та висновки, їхню новизну.

Вважаю, що дисертація *Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах* задовольняє всі вимоги МОН України щодо докторських дисертацій, а її авторка Олена Володимирівна Ромащенко заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент



Засенко Володимир Іванович
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
заступник директора з наукової роботи
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

29 квітня 2021 р.

Підпис Засенка В.І. засвідчую



Вчений секретар

Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

С.М. Перепелиця