

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ладигіної Марини Сергіївни

**«Спектральні характеристики компресійної плазми в системах типу магнітоплазмовий компресор та плазмовий фокус»,**

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Розробка нових типів плазмових джерел, а також дослідження динаміки плазмових потоків є однією з найважливіших проблем фізики плазми і плазмодинаміки. Інтерес до вивчення процесів, що мають місце у плазмових пристроях, які генерують компресійні потоки замагніченої плазми, зумовлений їхньою виключно важливою роллю у різних технологічних застосуваннях (літографія, джерела іонів та випромінювання в широкому діапазоні спектра, модифікація матеріалів плазмовими потоками та нанесення покриттів, плазмові космічні двигуни тощо). Плазмодинамічні системи типу магнітоплазмовий компресор (МПК) та плазмовий фокус (ПФ) використовуються у сучасних фундаментальних наукових дослідженнях із керованого термоядерного синтезу (КТС), плазмохімії і плазмодинаміки.

Важливість проблеми дослідження динаміки імпульсних плазмових потоків та плазмових фокусів різної конфігурації зумовлена можливістю отримання потужних джерел високоенергетичних частинок та різних типів випромінювання. Такі дослідження дозволяють сформулювати низку масштабних закономірностей ПФ, а також усвідомити шляхи просуватання у бік мульти-мегаджоульних технологій ПФ. Саме через це, поява найновітніших та найпотужніших плазмодинамічних джерел конче потребує розробки найсучасніших методів діагностики, які повинні забезпечувати високу точність вимірювань у реальному масштабі часу та бути безконтактними. Тому актуальність дисертаційної роботи, яка присвячена саме задачі розвитку та удосконаленню сучасної спектроскопічної діагностики щільних компресійних потоків плазми і аналізу взаємодії таких потоків з матеріалами мішені, не викликає сумніву.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках тематичного плану Інституту фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ІФП ННЦ ХФТІ) та кількох програм міжнародного співробітництва. Здобувачка розв'язала низку важливих

задач щодо вивчення динаміки щільних компресійних плазмових потоків та встановлення особливостей їх компресії при використанні плазмоутворюючих газів різної маси, дослідження процесів взаємодії плазми з поверхнею і поведінки матеріалу мішеней, які є актуальними для використання в комп'ютерних експериментах у зв'язку з майбутнім реактором-токамаком ITER, що перебуває на стадії будівництва. Результати роботи є цікавими у науковому відношенні і корисними для практичного застосування.

Дисертація оформлена згідно з вимогами МОН України і складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури та одного додатку.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовується актуальність обраної теми, формулюються мета і задачі дослідження, визначено їх зв'язок із науковими програмами, вказується наукова новизна та практична цінність здобутих результатів, чітко відображено особистий внесок здобувачки в наукових працях, які опубліковані разом із численними співавторами; підтверджено апробацію матеріалів дисертації, результати якої представлялись на більш, ніж 25 міжнародних конференціях з фізики плазми.

У першому розділі описано розвиток плазмодинамічних систем, які здатні генерувати щільні потоки компресійної плазми. На основі літературних джерел проаналізовано фізичні процеси, що відбуваються при генерації потужних компресійних плазмових потоків МПК та ПФ. Проведено аналіз сучасного стану щодо розвитку діагностичних методів плазми, що дозволило визначити пріоритетні напрямки досліджень.

У другому розділі розглянуто конструкції експериментальних установок, які використовувались під час проведення досліджень. Надано короткий опис магнітоплазмового компресора, плазмових фокусів PF MAJA-60, PF-360, DPF-1000 та стержневого інжектора RPI-IBIS. Наведено основні діагностичні методи і перелік апаратури, що використовувались для визначення основних параметрів та динаміки плазмових потоків. Слід відзначити проведений автором аналіз можливостей застосування спектральних методів для вимірювань густини плазми в компресійних потоках плазми при використанні спектральних ліній різних газів. Експериментально отримано залежності параметру штарківського розширення спектральних ліній від електронної густини плазми для низки елементів. Густина заряджених частинок у даному методі визначається шляхом зіставлення виміряних контурів ліній і розрахованих.

Третій розділ дисертації присвячено спектроскопічним дослідженням динаміки плазми в МПК при його функціонуванні з імпульсним напуском робочого газу. Проведені детальні дослідження динаміки плазмових потоків та формування області компресії при роботі на азоті, ксеноні та суміші гелію та ксенону. Особлива увага приділялась вибору робочих режимів. Розрахована електронна густина плазми та визначена її динаміка у прискорювальному каналі компресора. Визначено максимальні плазмові параметри, що досягаються в області компресії при роботі на газах з різною масою. Показано, що при використанні азоту область компресії формується в міжелектродному просторі, а на ксеноні вона значно відсувається від електродів. Проведено аналіз впливу ефекту самопоглинання спектральних ліній ксенону на значення електронної густини плазми.

У четвертому розділі дисертації авторкою вивчено та проведено порівняння умов подібності розвитку плазмових розрядів при використанні різних газів. Визначено особливості компресійних та прискорювальних режимів роботи МПК. Описано розвиток розряду та визначення плазмових параметрів у комбінованих розрядах (при інжекції ксенону у зону компресії, яка сформована на гелії). Показано, що початкова концентрація частинок значно впливає на розвиток плазмового розряду та положення зони компресії.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням взаємодії щільних потужних плазмових потоків з матеріалами, що є актуальними для застосування у термоядерній проблематиці та для технологій. Обґрунтовано подібність локальних плазмових утворень компресійної плазми в МПК та ударно-стисненої плазми, що утворюється при взаємодії плазми з поверхнею матеріалу. Показано, що біля поверхні мішені формується щільний шар плазми, який характеризується високою густиною плазми, як і в області компресії МПК. Описано методологію, яка дає змогу зареєструвати спектральні лінії тугоплавкого матеріалу вольфраму, вивчення динаміки розпорошення якого є важливим для термоядерних застосувань.

Слід 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 поставленого наукового завдання та задач дисертації.

Наведений вище аналіз матеріалу дисертації дозволяє виділити низку нових наукових результатів, до яких в першу чергу треба віднести:

1. Вперше вивчено залежність динаміки стиснення і параметрів плазми в області компресії від початкових умов розвитку розряду. Вивчено

- вплив початкової концентрації газу, початкового тиску в камері, масових витрат на розвиток розряду і формування області компресії.
2. Вперше встановлено, що положення області компресії визначається в основному початковою концентрацією робочого газу в каналі. Залежно від початкової концентрації газу область компресії зміщувалась ближче або далі від електродів МПК.
  3. Вперше проведено аналіз умов подібності при розвитку розряду в МПК з використанням різних робочих газів або сумішей газів, що відрізняються атомною масою. Показано, що максимальна величина густини при заданій початковій концентрації частинок робочого газу не залежить від інтегральних масових витрат, що дає змогу ефективно проводити експерименти не тільки при роботі на різних газах, але і на їх різноманітних сумішах, залежно від поставленої задачі.
  4. Вперше виявлено, що при опроміненні поверхні високоенергетичними плазмовими потоками виникнення щільних ударно-стиснених приповерхневих шарів плазми великою мірою подібне до формування області компресії в МПК. Електронна концентрація в плазмових шарах, що формуються при взаємодії потоків плазми з поверхнею, досягає значень, близьких до густини в області компресії МПК.

Обґрунтованість проведених досліджень визначається тим, що здобуті в дисертації результати відповідають загальним положенням сучасної фізики плазми, узгоджуються із сучасною теорією прискорення та компресії замагніченої плазми, і забезпечується проведенням достатньої кількості дослідів та результатами інших авторів.

Достовірність експериментальних результатів, отриманих у роботі, досягнута завдяки використанню апробованих безконтактних методів оптичної діагностики з детальним теоретичним та експериментальним аналізом їх застосування в умовах плазми МПК та ПФ, адекватному вибору вимірювальної техніки з високою точністю вимірювання та без внесення збурень у плазмовий потік і проведенням достатньої кількості дослідів для подальшої коректної обробки результатів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вони не лише вирішують конкретні важливі фундаментальні завдання фізики плазми, але і можуть бути безпосередньо застосовані в роботах прикладного характеру у сучасних плазмових технологіях. Отримані в дисертаційній роботі результати дають можливість зменшувати ерозію електродів і забезпечити необхідну «чистоту» плазми для різних технологічних застосувань пінч-розрядів, що буде корисним при створенні плазмових джерел випромінювання у широкому діапазоні

спектру та для застосування в літографії. Експериментальні результати вивчення взаємодії плазмових потоків із поверхнями мішеней можуть застосовуватися при виборі оптимальних умов модифікації поверхонь матеріалів у процесі обробки потужними потоками плазми.

Всі етапи досліджень і отримані результати дисертаційної роботи у повному обсязі представлені в 19 публікаціях, з них: 13 є статтями у фахових журналах і 6 – у збірках праць міжнародних конференцій. Авторка виконувала дослідження на сучасних плазмодинамічних пристроях світового рівня у тісному співробітництві з фахівцями найвищої кваліфікації. Все це, безумовно, визначило високий рівень отриманих результатів і продемонструвало суттєвий внесок авторки у процес реалізації спектроскопічних досліджень.

В той же час, вказуючи на недоліки даної роботи, необхідно зупинитися на такому:

1. Спектроскопічні дослідження параметрів плазми, за твердженням авторки, виконані у припущенні існування в плазмі локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) (с.55, 58). Проте, жодних оцінок чи доказів щодо доцільності застосування саме цієї моделі для діагностики досліджуваної плазми в дисертації не наведено. На мою думку, саме невиконання цього припущення може призводити до розбіжності при визначенні електронної температури в плазмі із залученням відношень інтенсивності спектральних ліній, що випромінюються елементами однакової та різної кратності (наприклад, як на рис. 3.16 - Хе II/II і Хе III/II).

2. Похибка визначення густини плазми (електронної концентрації) із ширини спектральних ліній, розширених через квадратичний ефект Штарка, складає "в кращому випадку ~ 30 %" (с. 58). Чи є доречним, саме через цю обставину, стверджувати: "У прискорювальному (швидкому) режимі течії плазми ... невеликий максимум спостерігається на відстані 5 см від зрізу центрального електрода" (див. 3.15,а в дисертації та рис. 1,а в авторефераті)?

3. У розділі 5 дисертації досліджуються особливості взаємодії плазмових потоків з поверхнею мішені з різних матеріалів. Стверджується, що густина плазми в перехідному шарі значною мірою визначається динамічним тиском потоку, який налітає на перешкоду. Проте, внесок процесу термічної іонізації, зокрема, вольфраму, що випаровується, в роботі не досліджується.

4. На жаль, текст дисертації не позбавлений помилок друку (див., наприклад, с. 16, 33, 34), трапляються терміни, які є не зовсім



вдалим перекладом з російської мови (див., наприклад, с. 16, 20). Підписи на осях деяких рисунків, які, зокрема, демонструють поведінку електронної густини (див., наприклад, рис. 3.15, 3.16, 4.5, 5.13) не є досконалими або обтяжені надлишковою інформацією (див., наприклад, рис.3.6 ).

Проте, наведені зауваження не можуть вплинути на загальну високу оцінку дисертаційної роботи та не змінюють позитивної думки про наукову обґрунтованість і правомірність положень та висновків дисертації.

Дисертація Ладигіної М. С. є завершеною науковою працею, в якій наводяться результати нових важливих експериментальних досліджень та проведено аналіз цих результатів. Робота виконана на високому науковому рівні, а стиль викладення в цілому відповідає прийнятому в науковій літературі.

Автореферат повною мірою відбиває зміст дисертаційної роботи.

Вважаю, що за обсягом проведених досліджень, їх високим науковим рівнем, новизною, практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота «Спектральні характеристики компресійної плазми в системах типу магнітоплазмовий компресор та плазмовий фокус» повністю відповідає всім вимогам п. 9, 11 та 13 Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року щодо кандидатських дисертацій. Авторка роботи Ладигіна Марина Сергіївна цілком заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри фізичної електроніки  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
доктор фізико-математичних наук, професор

 Веклич А. М.



