

МІНІСТЕРСТВО НАУКИ І ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В.Н. КАРАЗІНА



ЛАДИГІНА МАРИНА СЕРГІЇВНА

УДК 533.9

**СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕСІЙНОЇ
ПЛАЗМИ В СИСТЕМАХ ТИПУ
МАГНІТОПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ТА ПЛАЗМОВИЙ ФОКУС**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор **ГАРКУША Ігор Євгенійович**, заступник генерального директора Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор **ВЕКЛИЧ Анатолій Миколайович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри фізичної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, доцент **ЗИКОВ Олександр Володимирович**, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій.

Захист відбудеться "27" квітня 2018 р. о 17⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України за адресою: 61108, м. Харків, пр. Курчатова 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України за адресою: 61077, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розіслано "26" березня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12



Гах А.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У дисертаційній роботі представлені результати експериментальних досліджень впливу початкових та граничних умов в розрядах, що пінчуются, на особливості динаміки компресійних плазмових потоків та формування області компресії при використанні робочих газів різних мас та їх сумішей у магнітоплазмовому компресорі (МПК). Також досліджено формування та поведінку щільних приповерхневих шарів плазми при взаємодії потужних плазмових компресійних потоків із поверхнями деяких матеріалів.

В даний час, завдяки стрімкому розвитку нових технологій, дослідження компресійних потоків щільної замагніченої плазми особливо важливі для детального вивчення фізичних процесів їх генерації і динаміки та використання в широкому колі різних технологічних застосувань.

Одним із найважливіших застосувань даних плазмових потоків є їх використання в якості потужних плазмових джерел іонів і генерації випромінювання в різних діапазонах довжин хвиль. В той же час замагнічені плазмові потоки, що пінчуются, використовуються для дослідження важливих особливостей взаємодії плазми з поверхнями різних матеріалів, моделювання космічних явищ (протуберанці, плазмові джети), що супроводжуються генерацією плазмових струменів, новітніх плазмових технологій для осадження і модифікації різних покриттів. Сильнострумові розряди можуть бути реалізовані при роботі на різних плазмоутворюючих газах або сумішах газів при відповідному виборі початкових умов.

Потужні потоки щільної замагніченої плазми, що генеруються імпульсними сильнострумовими розрядами, можуть мати значний вплив на матеріали. Інформація про параметри, динаміку і характеристики плазмових потоків дає можливість передбачити поведінку матеріалу в умовах значних корпускулярних і енергетичних навантажень, а також вивчити поведінку домішок матеріалу в приповерхневій плазмі, що важливо для термоядерної проблематики.

Слід зазначити, що для вивчення фізичних процесів, що протікають у компресійній плазмі, що рухається, та в приповерхневих шарах щільної плазми при гальмуванні потоків на поверхні матеріалів, використання контактних методів діагностики часто неможливе в силу внесених збурень і великих енергетичних потоків на вимірювальні елементи. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток сучасних і безконтактних діагностик (перш за все спектральних методів), що необхідно як для успішного проведення фундаментальних досліджень фізичних процесів у високоенергетичній плазмі, так і для різних технологічних завдань.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до тематики досліджень, що проводились в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ІФП ННЦ ХФТІ), в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт: – Програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки та техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», затверджена розпорядженням Кабінету міністрів України № 421-р від 13.09.2001, № держреєстрації 080901UP0009 від 08.10.2001. Теми: «Дослідження потоків плазми

в багатошільовій електромагнітній пастці «Юпитер-2М», взаємодія потужних потоків плазми з поверхнями матеріалів»; «Модельні експерименти і розрахунки в обґрунтуванні розробки джерела термоядерних нейтронів, вибору матеріалів диверторних пластин термоядерного реактора, поліпшення властивостей конструкційних матеріалів»; «Розробка джерел важких іонів, електронів і потоків плазми та їх застосування для нагрівання і діагностики високотемпературної плазми, а також в плазмових технологіях», № держреєстрації 080906UP0010 (2005-2010 рр.).

– Програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки та техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут». Тема: «Генерація потужних потоків плазми, створення високоефективних джерел важких іонів та електронів та їх використання в термоядерних дослідженнях та технологічних застосуваннях», № держреєстрації 01PU009606 (2011-2015 рр.).

– Державна програма фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки. Теми: Х-813 «Дослідження стійкості конструкційних матеріалів і компонентів при опроміненні потужними іонно-плазмовими потоками та ерозійних механізмів в умовах великих енергетичних навантажень», № держреєстрації 080999UP0009 (2004-2006 рр.); Х-5-521 «Дослідження впливу потужних імпульсних та квазістаціонарних потоків плазми з флюенсом 10^{23} - 10^{28} іон/м²с на формування поверхневих пошкоджень та зміни фізико-механічних властивостей конструкційних реакторних матеріалів» (2007-2008 рр.); Х-7-214 «Формування градієнтних структурно-фазових станів, що зумовлюють покращення експлуатаційних характеристик елементів конструкцій ЯЕУ та створення експериментального стенду радіаційно-пучкового впливу на матеріали ядерної і термоядерної енергетики» (2009-2010 рр.).

– Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій в галузях економіки». Теми: Х-4-7 «Створення комплексу енергоживлення та вакуумної системи для експериментального стенду радіаційно-пучкового впливу на матеріали ядерної і термоядерної енергетики», № держреєстрації 0111U00734209 (2011-2012 рр.); Х-5-1 «Фізичний запуск нового експериментального стенду радіаційно-пучкового впливу на матеріали ядерної і термоядерної енергетики», № держреєстрації 0113U005693 (2013-2015 рр.).

– Теми міжнародного співробітництва Міністерства освіти та науки України із Польщею: «Дослідження властивостей імпульсних потоків щільної плазми, розробка плазмових методів покращення властивостей поверхонь», № держреєстрації ОК 0203U008364; «Розвиток і застосування різних методів діагностики плазми та поверхні для дослідження процесів модифікації твердих поверхонь матеріалів», № держреєстрації 0104U007424.

– Дослідження в рамках конкурсу спільних наукових проектів Державного фонду фундаментальних досліджень України та Білоруського фонду фундаментальних досліджень 2012 року.

- Дослідження в рамках конкурсу спільних наукових проектів НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень 2012 року. Тема «Експериментальні та теоретичні дослідження динамічних та випромінюючих характеристик потоків у плазмових прискорювачах і магнітоплазмових компресорах нового покоління», № держреєстрації 0112U005007 (2012-2013 рр.).
- Дослідження в рамках конкурсу спільних наукових проектів НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень 2014 року. Тема «Генерація потоків плазми в плазмо-динамічних системах та дослідження їх стійкості в просторі і часі», № держреєстрації 0114U004411 (2014-2015 рр.).
- Цільова програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» (Постанова Президії НАН України № 178 від 14.09.2016). Тема «Динаміка потоків, що стискаються, за межами прискорювального каналу, та їх вплив на різні поверхні» (2017-2019 рр.)

Мета і задачі досліджень. Основною метою дисертаційної роботи є виявлення фізичних процесів, які обумовлюють компресію плазмових потоків, визначення спектральних характеристик компресійної плазми в системах типу магнітоплазмовий компресор і плазмовий фокус (ПФ), вивчення впливу початкових і граничних умов розвитку розряду на розміри області компресії, її місце розташування і параметри плазми, а також залежності динаміки стиснення плазми від атомної маси плазмоутворюючого газу, в тому числі і у випадку багатокомпонентної плазми.

Для досягнення цієї мети сформульовано й розв'язано наступні задачі:

- розробка і створення комплексу оптичної діагностики з необхідними часовим і просторовим розділеннями, аналіз особливостей застосування спектроскопії в умовах щільної замагніченої плазми МПК і ПФ, адаптація методів оптичної діагностики для імпульсних компресійних плазмових потоків;
- дослідження динаміки щільних плазмових потоків при роботі на газах з різними масами і їх сумішах в залежності від особливостей газового напуску (початкової концентрації та тиску газу, масових витрат), оптимізація режимів роботи магнітоплазмового компресора і плазмових фокусів;
- аналіз умов подібності розвитку розряду при використанні різних робочих газів або суміші газів, що відрізняються атомною масою;
- вивчення динаміки плазмових потоків, процесу їх стиснення і формування зони компресії при різних початкових умовах;
- виявлення загальних закономірностей формування локальних компресійних плазмових шарів у МПК і щільних шарів приповерхневої плазми при взаємодії високоенергетичних плазмових потоків з матеріалами;
- визначення домішкового складу плазмових потоків при взаємодії плазми з поверхнями різних матеріалів, аналіз особливостей генерації та динаміки домішок в залежності від різних експериментальних умов.

Об'єкт дослідження – компресійні плазмові потоки, що генеруються сильнострумовим квазістаціонарним і імпульсними джерелами типу МПК та ПФ, приповерхневі шари щільної замагніченої плазми, що формуються при взаємодії високоенергетичної плазми з поверхнею матеріалів.

Предмет досліджень – процеси формування області компресії і їх залежність від початкових і граничних умов розвитку розряду, спектральні характеристики компресійної плазми при роботі з газами різної атомної маси, динаміка взаємодії компресійних плазмових потоків з матеріалами.

Методи досліджень. Для експериментальних досліджень динаміки щільних плазмових потоків і їх параметрів використовувався комплекс оптичної діагностики. Оптичні та спектральні прилади, що використовувались, забезпечили необхідні високі показники просторового і часового розділення в умовах коротких тривалостей плазмового розряду. Електронна густина плазми визначалась за штарківським розширенням спектральних ліній основного робочого газу і домішкових елементів (з урахуванням і без урахування ефекту самопоглинання). Електронна температура розраховувалася по відношенню інтенсивностей спектральних ліній різних стадій іонізації. Швидкість плазмового потоку визначалася часово-пролітним методом. Динаміка плазмового потоку і процеси формування зони компресії досліджувалися за допомогою високошвидкісної фотореєстрації. Безконтактні методи діагностики, що використовувались, дозволили досліджувати локальні компресійні формування без внесення збурень у плазмовий потік, що обумовлювало точність вимірювань і достовірність отриманих результатів. Дані оптичних досліджень доповнювалися результатами зондових вимірювань і калориметрії.

Наукова новизна отриманих результатів.

В результаті проведених комплексних досліджень вперше визначені особливості генерації щільних потоків замагніченої плазми магнітоплазмового компресора при роботі на «важких» газах, маса яких перевищує масу можливих домішкових іонів (матеріал електродів і ізоляторів).

Вперше досліджена залежність динаміки стиснення і параметрів плазми в області компресії від початкових умов розвитку розряду. Вивчено вплив особливостей напуску газу (початкової концентрації газу, масових витрат, початкового тиску в камері) на розвиток розряду і формування області компресії МПК при стисненні плазмового потоку.

Вперше експериментально встановлено, що положення області компресії визначається в основному початковою концентрацією робочого газу в каналі. При зменшенні початкової концентрації газу область компресії зміщувалась від електродів. Збільшення початкової концентрації газу, за умови збереження інтегральних масових витрат, призводило до зміщення області компресії до зрізу центрального електрода МПК.

Вперше проведено аналіз умов подібності при розвитку розряду 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 інтегрального параметра обміну (інтегральних масових витрат).

Вперше виявлено, що при опроміненні поверхні високоенергетичними плазмовими потоками виникнення щільних ударно-стиснених приповерхневих шарів холодної плазми в значній мірі подібне формуванню 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.

Використання комбінації різних плазмодинамічних систем для вивчення поведінки вольфраму та інших матеріалів в умовах екстремальних корпускулярних та енергетичних навантажень у процесах взаємодії інтенсивних плазмових потоків з матеріалами КТС вперше дозволило вивчити динаміку випаруваного матеріалу в приповерхневій плазмі та її вплив на характеристики приповерхневих плазмових шарів при варіації в широкому діапазоні концентрацій частинок та тривалостей генерації компресійних потоків плазми.

Практичне значення отриманих результатів. Результати виконаних досліджень представляють цінність для широкого кола прикладних задач. Отримані в дисертаційній роботі результати дають можливість «керування» плазмовим потоком і, тим самим, зменшення ерозії електродів і забезпечення необхідного складу домішок у плазмі для різних технологічних застосувань пінч-розрядів, перш за все в задачах створення потужних плазмових джерел короткохвильового випромінювання і для застосування в літографії.

Інформація, отримана при взаємодії щільних плазмових потоків з матеріалами, має велике значення для задач термоядерної енергетики. Зокрема, отримані результати будуть використані для аналізу фізичних процесів і інтерпретації основних ефектів, що відбуваються при взаємодії високоенергетичної плазми з матеріалами, поведінки домішок матеріалу мішеней під час розряду, параметрів приповерхневої плазми в подальших дослідженнях впливу плазми на матеріали великих термоядерних установок.

Особистий внесок здобувача. Автором внесено визначальний вклад у підготовку і проведення всіх експериментальних робіт, які лягли в основу представленої дисертаційної роботи, обробку даних і аналіз отриманих результатів. Дисертантка брала безпосередню участь в обговоренні та інтерпретації отриманих результатів, написанні та підготовці наукових статей, опублікованих за темою дисертації, представленні результатів на міжнародних конференціях.

У публікаціях [1, 2] дисертантка дослідила динаміку матеріалу, що розпилюється з поверхні мішені під час взаємодії плазмових потоків з вольфрамом на DPF-1000; автором визначені параметри плазмових потоків у різних режимах роботи плазмового фокуса та вплив на них величин розрядної напруги та додаткового напуску газу. В [3] запропонувала та реалізувала схему для реєстрації спектрів з часовою роздільністю на основі дифракційного монохроматора з електронно-оптичним перетворювачем. Підготувала та синхронізувала високошвидкісну фотореєструючу установку ВФУ-1, за допомогою якої провела дослідження динаміки плазмових потоків, що генеруються МПК, та виявила особливості формування області компресії. Провела розрахунки електронної густини та температури плазми. В роботах [3 – 5] провела аналіз та порівняння результатів, отриманих за допомогою спектральних методів діагностики, при роботі на газах з різними масами, а також їх сумішах. Виміряла експериментальні напівширини та інтенсивності спектральних ліній азоту, ксенону, аргону, гелію та розрахувала електронну густину та температуру плазми в МПК. У статтях [4, 6] автор провела розробку комплексу оптичної діагностики, що застосовувався у всіх експериментах на установці МПК та підготувала до експлуатації його елементи. Зокрема, вона збила оптичні схеми з дифракційним

спектрометром, що використовувався для реєстрації інтегральних спектрів, а також з використанням поворотної призми для реєстрації спектрів вздовж осі потоку. В роботах [7, 8] дисертантка проаналізувала умови та особливості формування області компресії при роботі з азотом та ксеноном, а також гелієм та аргоном. Використовуючи експериментальні напівширини та повні інтенсивності спектральних ліній робочих газів, вона оцінила електронну густину та температуру плазми. Визначила умови подібності розвитку розряду, а також особливості формування області компресії. Проаналізувала вплив початкових умов на динаміку плазових потоків та їх компресію при роботі на легких та важких газах. У статтях [5, 9], використовуючи методи оптичної спектроскопії, автор визначила параметри плазми, за допомогою яких дослідила вплив додаткового локального напуску газу в область компресії на МПК і в зону фокуса на ПФ. В [10] визначила оптичну товщину плазми, що генерується МПК, і провела детальний аналіз самопоглинання спектральних ліній ксенону в компресійній плазмі та аналіз можливих помилок при визначенні густини плазми по уширенню самопоглинених ліній. На установках RF-Маја та RPI-IBIS вона дослідила взаємодію щільних плазових потоків з вольфрамом [11, 12], де за допомогою спектральної діагностики проаналізувала вплив енергетичного складу плазового потоку і параметрів плазми на умови розпилення матеріалу мішені. У [13] провела порівняльний аналіз впливу густини і енергетичного вмісту плазового потоку на інтенсивність і динаміку розпилення матеріалу вуглецевої мішені (carbon fiber composite CFC), визначила умови, що дозволяють зменшити розпилення матеріалу з поверхні і тим самим запобігти забрудненню потоку. У роботах [14, 15] вона визначила оптимальні режими роботи установки і параметри плазми, з'ясувала динаміку плазових потоків МПК при роботі на «важких» газах Хе и Ag, а також дослідила динаміку формування області компресії. У [16] провела спектроскопічні дослідження під час опромінення вольфрамових мішеней плазовими потоками, що генеруються DPF-1000, і вивчила вплив додаткового газового напуску на процеси взаємодії, динаміку та розпилення матеріалу мішені. У роботах [17, 19] провела додаткові дослідження на установках зі значною різницею в тривалості генерації плазових імпульсів і з'ясувала особливості їх впливу на різні матеріали, перспективні для використання в термоядерних застосуваннях. У [18] вона проаналізувала особливості розрахунку електронної густини по лініям з самопоглинанням, використовуючи штарківські напівширини спектральних ліній дейтерію.

Апробація результатів дисертації. Результати, що представлено в дисертаційній роботі, доповідались на міжнародних конференціях: International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta, Crimea, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012); Международная школа молодых ученых по ядерной физике и энергетике (Алушта, Крым, 2005); 22nd Symposium on Plasma Physics and Technology (Czech Republic, Prague, 2006); 33rd EPS Conference on Plasma Physics (Italy, Rome, 2006); 6th International Workshop and Summer School «Towards Fusion Energy - Plasma Physics, Diagnostics, Spin-offs» (Kudowa Zdroj, Poland, 2006); PLASMA 2007: International Conference on Research and Applications of Plasmas (Germany, Greifswald, 2007); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу

(Київ, Україна, 2007, 2009, 2011); 23rd Symposium on Plasma Physics and Technology (Prague, Czech Republic, 2008); 35th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Greece, Hersonissos, 2008); Third ITER Summer School: «Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices» (Aix en Provence, France, 2009); 24th Symposium on Plasma Physics and Technology (Czech Republic, Prague, 2010); The 1st International Youth Conference on Fusion Energy (Daejeon, Korea, 2010); The 1st ITER-IAEA Technical Meeting (Monaco, 2010); 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1st International Conference on Fusion Energy Materials Science (Germany, Rosenheim, 2011); Международная школа молодых ученых по ядерной физике и энергетике (Алушта, Крым, 2011); PLASMA-2011: International Conference on Research and Applications of Plasmas (Warsaw, Poland, 2011); 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics 16th International Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2012); ESCAMPIG XXI (Viana do Castelo, Portugal, 2012); Kudowa Summer School «Towards Fusion Energy» (Kudowa Zdrój, Poland, 2014); International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkov, Ukraine, 2014); Joint ICTP-IAEA School and Workshop on Modern Methods in Plasma Spectroscopy (Trieste, Italy, 2015); PLASMA 2015: International Conference on Research and Applications of Plasmas (Warsaw, Poland, 2015); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, September 12 – 15, 2016).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 19 роботах, у тому числі в 13 статтях у фахових наукових журналах та 6 доповідях у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Повний обсяг дисертації складає 170 сторінок, з них 137 сторінок основного тексту з 71 рисунком. Список використаних літературних джерел містить 119 найменувань та складає 11 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність, розглянуто основні проблеми, що є предметом вивчення, зазначені мета і задачі досліджень. Визначено зв'язок дисертаційної роботи з тематикою досліджень, що проводяться в ІФП ННЦ ХФТІ.

У першому розділі розглянуто класифікацію та розвиток плазмодинамічних систем, що генерують щільні потоки компресійної плазми. На основі літературних джерел проаналізовано фізичні процеси, що відбуваються при генерації потужних компресійних плазмових потоків МПК та ПФ. Наведено огляд експериментальних робіт по взаємодії плазми з різними матеріалами. Проведено аналіз сучасного стану щодо розвитку діагностичних методів плазми. Це дозволило сформулювати мету досліджень та поставити задачі для її реалізації.

У другому розділі представлено опис експериментальних установок, методів діагностики та спектроскопічного обладнання, що використовувались в описаних дослідженнях.

У підрозділі 2.1.1 наведено опис МПК, що може генерувати компресійні плазмові потоки при роботі на різних плазмоутворюючих газах, від водню до ксенону. Описані режими роботи МПК при імпульсному напуску газу, при його роботі на буферному (фоновому) газі та в комбінованих розрядах. Режим роботи плазмового джерела при імпульсному напуску газу вибирався за допомогою варіювання часової затримки τ між початком напуску газу та ініціюванням основного розряду, тобто зміною кількості газу, що напускається в міжелектродний простір та бере участь у розвитку розряду. При роботі МПК з різними газами часова затримка τ змінювалась в межах від 300 до 700 мкс. При роботі установки на фонових газах режими роботи обирались зміною початкового тиску робочих газів. Описано комплекс оптичної діагностики, що використовувався для проведення спектральних вимірювань, а також оптичні та спектральні прилади, що були задіяні в експериментах – оптичні спектрометри (MECHELLE®900, ДФС-452), монохроматор (МДР-23), електронно-оптичний перетворювач (ЕОП), високошвидкісна фотореєструюча установка (ВФУ-1), ВУФ-спектрограф.

У підрозділах 2.1.2-2.1.5 подано опис плазмових фокусів PF MAJA-60, PF-360, плазмового інжектора IBIS, які розташовано в Інституті ядерних досліджень (Варшава, Польща) та використовувались для дослідження процесів взаємодії плазмових потоків з вольфрамом, як основним матеріалом найбільш енергонавантажених зон термоядерного реактора, та вуглецевим композитом CFC. Дані пристрої були обрані для експериментів, щоб отримати інформацію про особливості взаємодії компресійних плазмових потоків, що відрізняються густиною електронів, енергонавантаженням у потоці, тривалістю генерації плазми з поверхнями матеріалів. Приведено опис модифікованого пристрою DPF-1000 (Інститут фізики плазми та лазерного мікросинтезу, Варшава, Польща), який здатний проводити розряди при додатковому напуску газу під час розвитку розряду, що дозволило збільшити час утримання фокуса.

У підрозділі 2.2 описуються спектральні методи діагностики, що використовувались у дослідженнях компресійних плазмових потоків. Зокрема, надано короткий опис відомих методик визначення електронної густини та температури плазми. Наведені діагностичні методи, які тією чи іншою мірою добре відомі і раніше вже застосовувались на практиці, однак існують особливості застосування цих методів в умовах щільної компресійної плазми. Необхідно відзначити, що використання комплексу оптичної діагностики дозволяє отримати достовірну інформацію щодо процесів прискорення плазми, а також проблеми взаємодії плазмових потоків з різними матеріалами.

У підрозділі 2.2.1 описано методику спектральних вимірювань та умови їх застосування при наявності ЛТР моделі. За умови обґрунтованого вибору спектральних ліній метод вимірювання концентрації електронів N_e за штарківським уширенням забезпечує великий діапазон вимірювань, аж до $N_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$. Вибір ліній має велике значення для виявлення області умов, за яких штарківське уширення не маскується іншими механізмами, виконується умова малої оптичної товщини, а область проведення вимірювань дозволяє вважати її однорідною. Невиконання цих умов не робить вимірювання густини неможливими, проте значно ускладнює обробку

і інтерпретацію експериментальних даних. Густина заряджених частинок у даному методі визначається при зіставленні вимірених контурів ліній і розрахованих. У загальному випадку слід брати до уваги як ударний, так і статистичний механізми уширення контурів спектральних ліній. У дисертаційній роботі для визначення густини плазми, в основному, використовувалися спектральні лінії робочих газів.

У підрозділі 2.2.1.2 наведено методи визначення температури плазми, що базуються на визначенні відношення повних відносних інтенсивностей спектральних ліній, що належать до різних стадій іонізації. Серед існуючих методів визначення температури оптично тонкої однорідної ЛТР-плазми цей метод є одним з основних і досить надійних в лабораторній практиці. Точність вимірювання електронної температури цим методом досить висока. Експериментальні помилки у визначенні інтенсивностей ліній і електронної густини зазвичай не перевищують 10 %, відповідно і похибка у визначенні T_e буде ~ 10 %. Для вимірювання максимальних значень температур, що досягаються в плазмі, необхідно використовувати лінії іонів найвищої кратності, зареєстрованих у спектрі випромінювання.

Третій розділ присвячено спектроскопічним дослідженням динаміки плазми в МПК при його функціонуванні з імпульсним напуском газу. У якості плазмоутворюючих газів використовувалися азот та ксенон. Проведені детальні дослідження динаміки плазмових потоків та формування області компресії.

У підрозділі 3.1 особлива увага приділяється вибору робочих режимів для одержання максимальних плазмових параметрів, для чого вимірювалась інтенсивність випромінювання континуума. За допомогою високошвидкісної зйомки визначено місце локалізації зони компресії, яка спостерігалась на відстані 2–3 см від катода при роботі з імпульсним напуском азоту в МПК. Мінімальний діаметр потоку в області стиснення становив ~ 1 см. На основі аналізу проведених спектроскопічних вимірювань отримано, що усереднена за часом розряду величина середньохордової електронної густини в зоні компресії досягає $(0.5 - 2) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що була оцінена по лініям N V. Максимальна температура електронів була оцінена зі співвідношення N V / N IV та склала $T_e = 7 - 7.7 \text{ eV}$.

У підрозділі 3.2 обґрунтовано застосування ксенону в експериментах його високою випромінювальною здатністю і перспективами використання в літографічних та інших застосуваннях як інтенсивного джерела короткохвильового випромінювання, зокрема, у діапазоні вакуумного ультрафіолетового випромінювання (ВУФ) на довжині хвилі $\lambda = 135 \text{ \AA}$.

У підрозділах 3.2.1-3.2.3 описано вибір часової затримки між початком напуску газу та подачею високої напруги на електроди та визначено компресійний та прискорювальний режими роботи МПК на ксеноні, як основні робочі режими для подальших досліджень. Визначено, що при роботі в компресійному режимі може реалізуватися асимптота плазмового фокуса, коли на розрядному струмі і напрузі спостерігається сплеск (як відбувається в плазмових фокусах), що вказує на максимальне стиснення плазмового потоку. Отримані розподіли електронної густини ксенонової плазми та її просторові розподіли наведено на рис. 1. У прискорювальному (швидкому) режимі течії плазми ($\tau = 500 \text{ мкс}$) максимальна величина густини досягає $N_e = 2.6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При цьому невеликий максимум спостерігається на відстані 5 см

від зрізу центрального електрода. У такому режимі роботи МПК області компресії не існує, і розподіли густини вздовж потоку не мають явно вираженого максимуму.

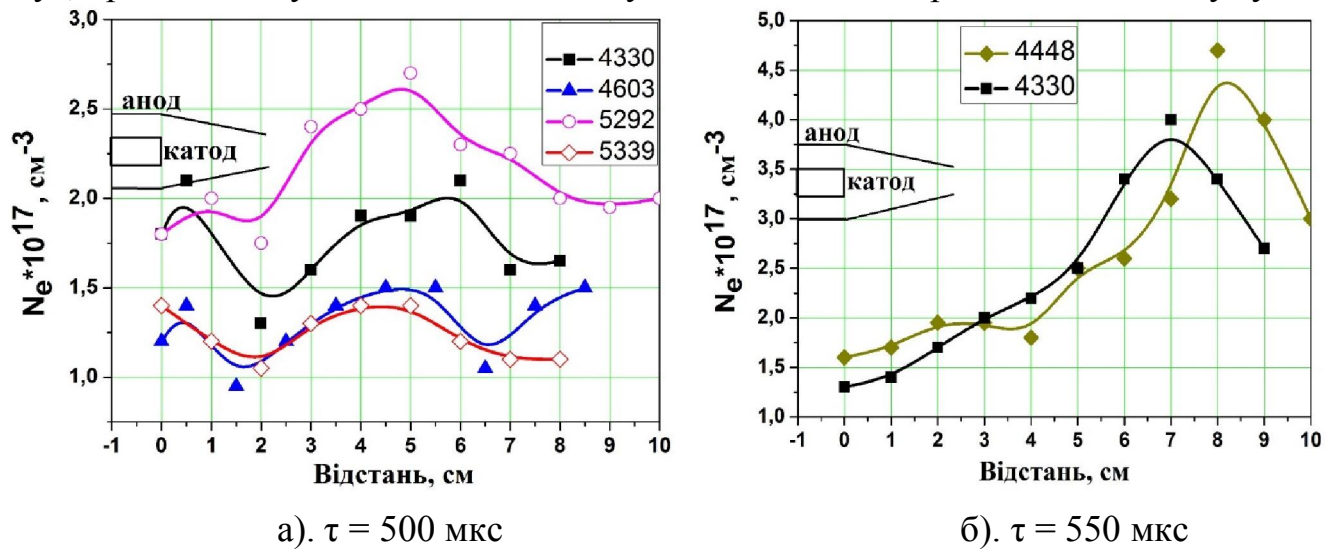


Рис.1. Просторові розподіли електронної густини, оціненої за спектральними лініями Хе II

При компресійному сценарії ($\tau = 550$ мкс) спостерігається яскраво виражена компресійна зона з максимальною густиною $N_e = (4 - 4.7) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що розташована на відстані 7 – 8 см від центрального електрода (рис. 1. б). Слід зазначити, що в даному режимі густина в максимумі зростає вдвічі по відношенню до її усередненої величини. При цьому величина густини на відстані 5 см (де спостерігався максимум для прискорювального режиму) також перевищує густину в потоці при затримці 500 мкс.

У підрозділі 3.2.4 проведено високошвидкісну фотозйомку розвитку плазових розрядів у різних режимах роботи (рис. 2). Оцінені характерні розміри області компресії та плазових потоків. У компресійному режимі особливістю динаміки потоку є його виражене осьове фокусування на відстані приблизно 7.5 – 8.5 см від зрізу внутрішнього електрода. При цьому мінімальний діаметр потоку складає ~ 1 см. Максимальна компресія досягається в проміжку часу $t = 5 - 7$ мкс.

У прискорювальному режимі мінімальний діаметр циліндричного плазового шнура становить 2.5 – 5 см і досягається приблизно на 5 – 8 мкс. Має місце пульсуючий

характер стиснення, коли діаметр дещо збільшується і потім знову стискається протягом часу реєстрації.

У підрозділі 3.2.5-3.2.7 проаналізовано еволюцію густини плазми в зоні компресії.

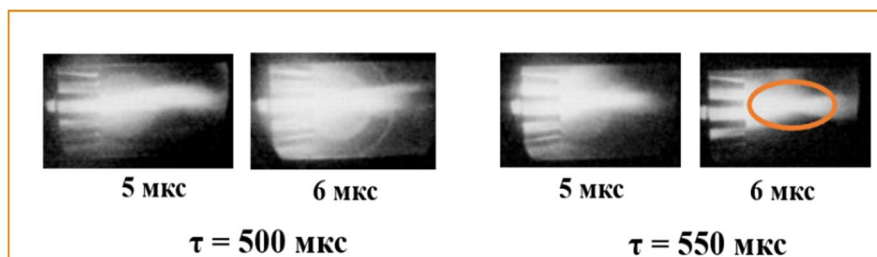


Рис. 2. Кадри розвитку розряду у прискорювальному режимі (зліва) та в компресійному (справа)

Аналіз оптичних спектрів із зони фокуса показав, що більшість спектральних ліній ксенону зазнають самопоглинання, крім кількох з них. Описано застосування методики визначення густини з урахуванням ефекту самопоглинання. Проведено

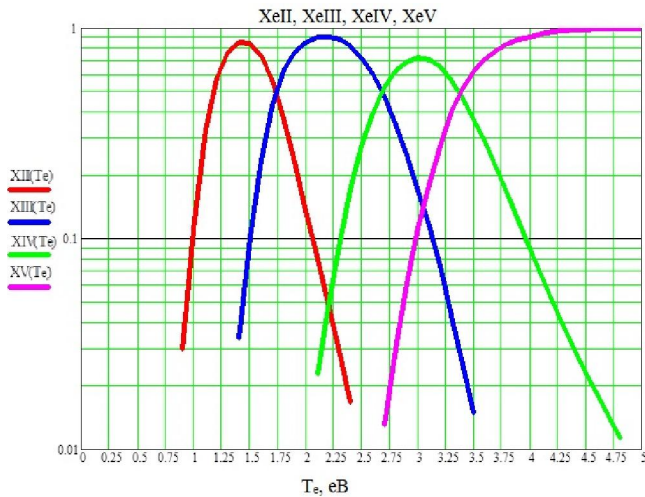


Рис.3. Розподіл Саха-Больцмана для іонів ксенону з різними стадіями іонізації

зарядністю Xe IV і Xe V повинні реєструватися при електронних температурах $T_e > 3 - 4$ eV (при $N_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

У підрозділі 3.2.8 досліджувалась поведінка ліній домішок при використанні ксенону. Спектральні лінії домішок (вуглець – C II, мідь – Cu I, Cu II, кальцій – Ca II) були ідентифіковані із спектрів, що походять з електродів, стінок камери та матеріалу ізолятора.

У підрозділі 3.3 описано експерименти при використанні суміші газів гелію та ксенону. Визначені відсоткові співвідношення сумішей газів для експериментів. При реалізації циліндричної симетрії потоків плазми з'являється можливість застосування зворотного перетворення Абеля для визначення радіального розподілу густини електронів. Максимальне значення густини плазми становить $N_e = (2 - 6) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

У підрозділі 3.4 наведено опис підготовки та проведення експериментів з реєстрації спектрів ВУФ-спектрометром. Проведено ідентифікацію високозарядних спектральних ліній ксенону. Аналіз отриманих результатів показує, що в експериментальному спектрі (рис. 4) чітко ідентифікуються лінії високоіонізованого ксенону Xe IV- IX, що дає

порівняння густини плазми, що було розраховано по самопоглинаним лініям, лініям без самопоглинання та при урахуванні ефекту самопоглинання. Визначено, що величина електронної густини завищена на 20 – 30 % при використанні для оцінок ліній ксенону, що відчують ефект самопоглинання. Використовуючи рівняння Саха-Больцмана оцінювалася електронна температура плазми по відношенню інтенсивностей спектральних ліній Xe II/Xe III і досягла 4–4.3 eV. З теоретичних розрахунків рівняння Саха-Больцмана (рис. 3) випливає, що іони з

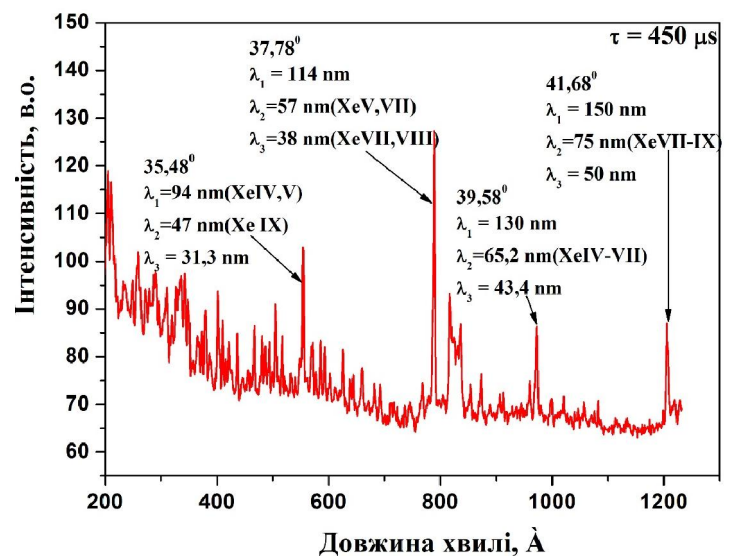


Рис.4. Спектр ксенону у ВУФ і УФ діапазонах

підстави очікувати температуру в області компресії на рівні ≥ 20 eV.

Четвертий розділ присвячено вивченню розвитку плазових розрядів МПК при роботі на буферних газах (He, Ar) та комбінованих розрядах з використанням «легкого» (He) та «важкого» (Xe) газів, що сприяло зниженню впливу ефекту самопоглинання на спектральні лінії.

У *підрозділі 4.1* описано особливості динаміки плазових потоків та формування області компресії при використанні робочого газу гелію. Розраховано густину плазми при роботі при різних тисках газу в робочій камері. З'ясовано, що густина плазми має максимум на відстані 4–7 см від зрізу центрального електрода незалежно від величини початкового тиску робочого газу. При залишковому тиску гелію у вакуумній камері 2 Торр реалізується компресійний режим: густина досягає максимуму $N_e = (2 - 3) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, спостерігається ефект витіснення магнітного поля з осі потоку та різке зменшення швидкості потоку.

У *підрозділі 4.2* проведено опис досліджень для аргону при різних початкових тисках. З результатів спектроскопічних вимірювань (рис. 5) випливає, що найбільш висока електронна густина $N_e = 3.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігається при тиску буферного газу $P(\text{Ar}) = 1 \text{ Торр}$, що вказує на компресійний режим роботи, де формується явно виражена область стиснення і досягається висока густина плазми.

У *підрозділі 4.3* проведено порівняльний аналіз експериментальних результатів, отриманих при роботі з гелієм та аргонем. Визначено, що компресійні режими роботи МПК характеризуються високою густиною плазми, гальмуванням потоку плазми в області компресії, витісненням магнітного поля з зони компресії. Вивчено вплив атомної маси фоновому газу на процеси генерації плазового потоку в МПК і формування області компресії. Проведено порівняльний аналіз динаміки плазми в МПК при роботі з «легким» і «важким» газами на прикладі гелію і аргону. Експериментальні дослідження показують, що положення зони компресії істотно залежить від початкової концентрації частинок. При зменшенні початкової концентрації газу область компресії зміщується від електродів.

У *підрозділі 4.4* описано визначення плазових параметрів при локальній інжекції ксенону у сформовану на гелії зону компресії. В отриманих спектрах ідентифіковані спектральні лінії Хе II–V, тобто присутні іони більш високих ступенів іонізації, ніж у випадках, описаних у попередньому розділі з імпульсним напуском ксенону (максимальна стадія іонізації Хе III). Детальний аналіз динаміки високоенергетичної частини плазового потоку був проведений на прикладі випромінювання спектральних ліній Хе V, які відповідають гарячій та щільній частині (ядру) плазового потоку і, тим самим, характеризують часову еволюцію

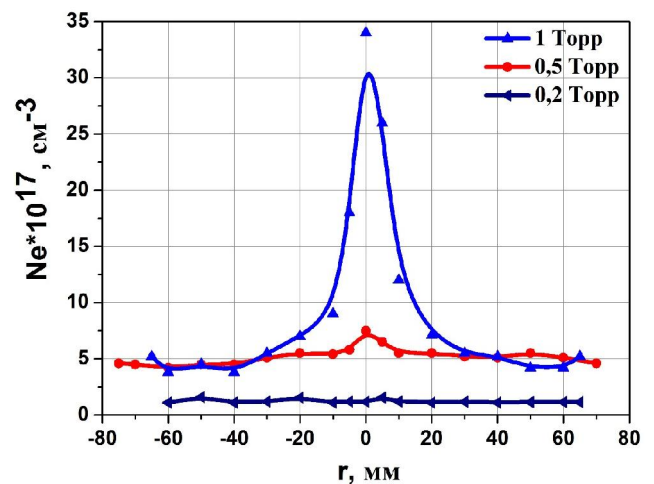


Рис. 5. Радіальні розподіли густини в області компресії для різних початкових тисків аргону

зони компресії. Поведінка густини плазми в області компресії розрахована з результатів хордових вимірювань штарківських напівширин спектральних ліній на відстані 6 см від зрізу центрального електрода МПК, представлена на рис. 6.

У підрозділі 4.5 показано, що в розрядах з додатковим напуском газу на плазмовому фокусі DPF-1000 електронна густина плазми в початкові моменти розряду значно вище (до $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в порівнянні з її величинами, отриманими без додаткового напуску газу (близько 10^{18} см^{-3}). Така відмінність була особливо помітною в момент максимального стиснення плазмового потоку. Надалі густина була на одному рівні для обох режимів роботи.

У п'ятому розділі досліджено особливості взаємодії щільних потужних плазмових потоків з деякими матеріалами. Обґрунтовано подібність локальних плазмових утворень компресійної плазми в МПК та ударно-стисненої плазми, що утворюються при взаємодії плазми з поверхнею матеріалу.

У підрозділі 5.1 наведено результати експериментальних досліджень на RF MAJA-60 при використанні мідно-вольфрамової пластини, що розташовувалась у центральному електроді. Електронна густина, оцінена за штарківським уширенням спектральної лінії D_α , досягала значення $N_e = (7 - 10) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в момент $t = 0.1 \text{ мкс}$, близький до максимального стиснення плазми. Короткі часові експозиції (0.2, 1 мкс) давали вищу точність вимірювання величин напівширин спектральних ліній, що збільшувало точність при визначенні електронної густини плазми. При використанні більш довгих експозицій (10 мкс) зменшувалася точність вимірювань (за рахунок усереднення за цей час), але з'являлася можливість реєстрації спектральних ліній матеріалу мішені, що було необхідно для аналізу її ерозії. Показано, що біля поверхні мішені формується ударно-стиснений шар плазми, який характеризується досить високою густиною плазми (що можна порівняти з областю компресії в МПК). Вплив континууму стає домінуючим у потрібний проміжок часу розряду, лінії нейтрального та однократно іонізованого вольфраму реєструються, коли густина електронів зменшується до 10^{17} см^{-3} .

У підрозділі 5.2.1 вивчались динаміка плазмового потоку та поведінка домішок у приповерхневій плазмі при опроміненні вольфрамових мішеней на плазмовому інжекторі RPI-IBIS. Проведені експерименти з реєстрації спектральних ліній вольфраму (рис. 7) дозволили вивчити поведінку матеріалу W-мішені в умовах зміни величини густини енергії (від 3 до 7 Дж/см²), переданої поверхні, для визначення порогу появи спектральних ліній вольфраму. При навантаженні 7 Дж/см² спостерігається інтенсивне випромінювання спектра вольфраму з чітко ідентифікованими лініями WI і WII. 5 Дж/см² – є мінімальним порогом для реєстрації спектральних ліній вольфраму. При енергетичному навантаженні 3 Дж/см² лінії вольфраму взагалі відсутні в спектрі. Визначено, що електронна густина значно

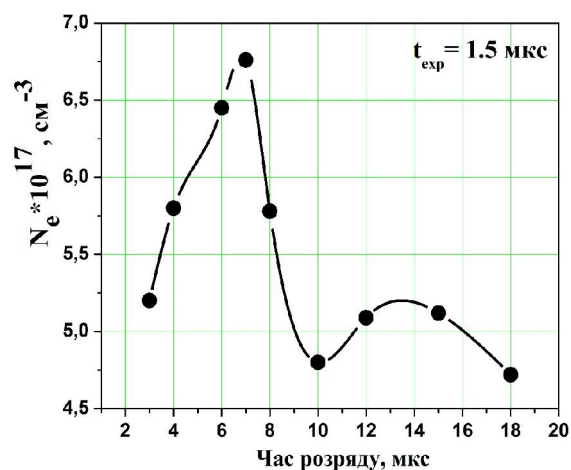


Рис. 6. Поведінка густини плазмового потоку під час розряду

зростає поблизу мішені та досягає 10^{17} см^{-3} при досить низькій величині густини, що спостерігається у вільному потоці $(5 - 7) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, що свідчить про формування щільного плазмового утворення та значну емісію матеріалу з поверхні мішені.

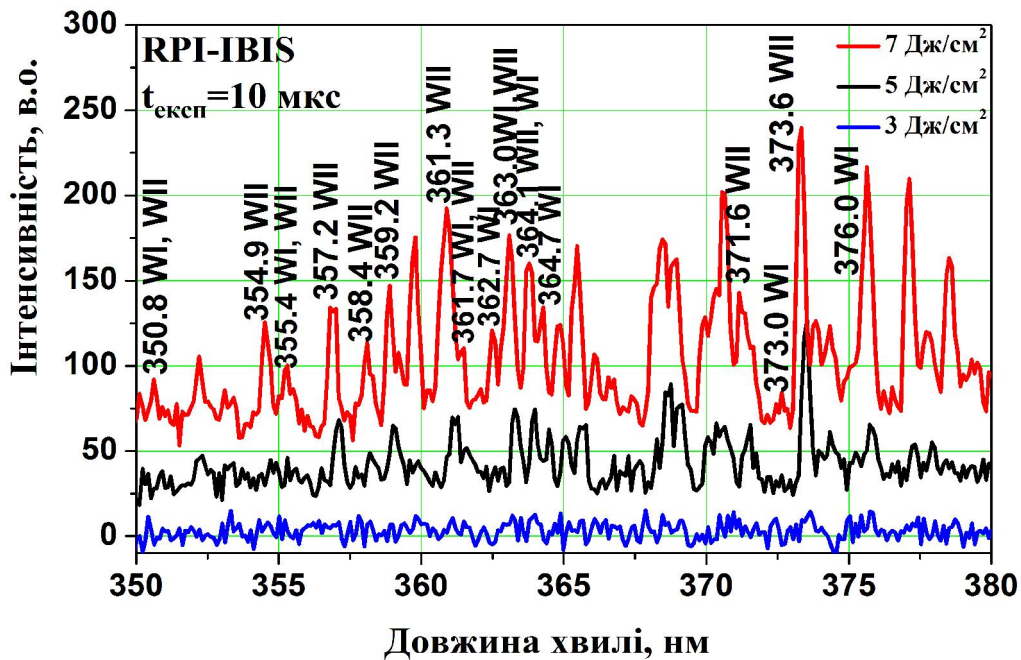


Рис. 7. Порівняння оптичних спектрів, зареєстрованих в експериментах з W-мішенню з різними енергетичними навантаженнями

У підрозділі 5.2.2-5.3 проаналізовано динаміку вуглецевих ліній при опроміненні CFC (carbon fiber composite) мішені на RPI-IBIS та PF-360 та вплив їх плазмових параметрів на інтенсивність випромінювання спектральних ліній вуглецю. Доведено, що найбільш інтенсивна емісія ліній домішок із приповерхневих шарів плазми здійснювалася при опроміненні мішені, яка містила найбільшу кількість закінчень волокон, що також спостерігалось і в описаних вище експериментах на RPI-IBIS. Визначено, що при збільшенні енергії плазмового потоку на PF-360 і електронної густини в потоці до 10^{18} см^{-3} інтенсивність емісії іонів вуглецю значно зростала, в порівнянні з режимами опромінення вольфраму менш щільними і менш енергетичними потоками на RPI-IBIS.

У підрозділі 5.4 представлено результати спектральних досліджень взаємодії потужних плазмових потоків з вольфрамовими мішенями на DPF-1000U. Густина плазми в перехідному шарі в значній мірі визначається динамічним тиском налітаючого потоку (концентрацією плазми в потоці і спрямованою енергією іонів). Аналіз отриманих результатів показав – спектральні лінії вольфраму, що спостерігаються, мають достатню інтенсивність для реєстрації навіть у розрядах при зниженій розрядній напрузі $U_0 = 16 \text{ кВ}$. Спектральні лінії вольфраму починають з'являтися в середньому на 2 – 4 мкс, і вони легко могли бути зареєстровані при більш тривалому часі експозиції, що дало можливість дослідити еволюцію спектра випромінювання домішкової приповерхневої плазми при взаємодії потоків плазми з вольфрамом.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально досліджено процеси генерації щільних замагнічених плазмових потоків і динаміку їх стиснення при роботі на «важких» інертних газах і сумішах газів в пінч-розрядах магнітоплазмового компресора МПК. Вивчено особливості формування області компресії, а також виміряні параметри компресійної плазми.
2. Вперше виявлено вплив початкових умов розвитку розряду на динаміку стиснення плазмового потоку в МПК і місце розташування області компресії. Встановлено, що положення області компресії визначається в основному початковою концентрацією робочого газу в каналі прискорювача. При зменшенні початкової концентрації газу область компресії зміщувалась від електродів. Збільшення початкової концентрації газу, за умови збереження інтегральних масових витрат, призводило до зміщення області компресії до зрізу центрального електрода МПК. Даний результат важливий для пошуку способів зменшення ерозії електродів у різних технологічних застосуваннях пінч-розряду.
3. Показано, що результати вимірювання густини плазми в області компресії добре узгоджуються з результатами теоретичного опису плазмових потоків, що самостійно стискаються, в рамках дворідинної МГД-моделі. Зокрема, підтверджено, що максимальна густина плазми в області компресії обернено пропорційна початковій густині робочого газу в прискорювальному каналі $N_{\max} \sim 1/\sqrt{N_0}$, що відповідає теоретичним уявленням. Експериментально отримане значення густини в області компресії МПК досягає величини, близької до розрахованої на основі МГД-моделі і становить $N_e = (3 - 5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
4. Проведено аналіз умов подібності при розвитку розряду з використанням різних робочих газів або сумішей газів, що відрізняються атомною масою. Встановлено, що максимальна величина густини при заданій початковій концентрації частинок робочого газу не залежить від інтегрального параметра обміну (інтегральних масових витрат). Результати цього аналізу дозволяють проводити оптимізацію розрядів в МПК з плазмою як «легких», так і «важких» газів.
5. Виявлено наявність так званих швидких і повільних режимів в МПК, які характеризуються відповідно меншою або більшою густиною плазми в області компресії. Тим самим показана можливість широкої варіації параметрів щільної замагніченої плазми для досліджень плазмо-поверхневої взаємодії в термоядерних і технологічних застосуваннях. З отриманих результатів випливає, що в повільних режимах МПК при імпульсному напуску можлива реалізація асимптоти плазмодинамічного фокусу, коли спостерігаються сплески на розрядному струмі і напрузі, що свідчить про нагрівання і максимальне стискання плазми.
6. Показано, що при опроміненні поверхні мішені плазмовим потоком виникнення щільних ударно-стиснених приповерхневих шарів холодної плазми в значній мірі подібно формуванню області компресії в МПК. Електронна концентрація в плазмових шарах, що формуються при взаємодії потоків плазми з поверхнею, може досягати $N_e = (5 - 7) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що є близьким до густини в області компресії МПК і в плазмовому фокусі.
7. Проведено спектральний аналіз приповерхневих плазмових шарів, що формуються при взаємодії високоенергетичної плазми з вольфрамовими мішенями, на установках

PF MAJA-60, PF-360, DPF-1000U, RPI-IBIS. Виявлено вплив параметрів плазмового потоку на динаміку вольфраму в приповерхневому плазмовому шарі. Експериментально показано, що інтенсивні плазмові потоки можуть бути використані в дослідженнях з КТС при вивченні поведінки вольфраму та інших матеріалів в умовах екстремальних корпускулярних і енергетичних навантажень, а також характеристик приповерхневих плазмових утворень і динаміки випаруваного матеріалу в приповерхневій плазмі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ladygina M.S., Skladnik-Sadowska E., Zaloga D.R., Sadowski M.J., Kubkowska M., Kowalska-Strzeciwillk E., Krawczyk N., Paduch M., Miklaszewski R., Garkusha I.E. Studies of plasma interactions with tungsten targets in PF-1000U facility // *Nukleonika*. – 2016. – 61(2). – P. 149-153.
2. Ladygina M.S., Skladnik-Sadowska E., Zaloga D., Malinowski K., Sadowski M.J., Kubkowska M., Kowalska-Strzeciwillk E., Paduch M., Zielinska E., Miklaszewski R., Garkusha I.E., Gribkov V.A. Study of tungsten surface interaction with plasma streams at DPF-1000U // *Nukleonika*. – 2015. – 60(2). – P. 293-296.
3. Ladygina M.S., Marchenko A.K., Solyakov D.G., Petrov Yu.V., Makhraj V.A., Yeliseyev D.V., Garkusha I.E. and Cherednichenko T.N. Dynamics of self-compressed argon and helium plasma streams in the MPC facility // *Physica Scripta*. – 2016. – 91. – 074006.
4. Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Ladygina M.S., Marchenko A.K., Petrov Yu.V., Solyakov D.G., Tsarenko A.V., Tereshin V.I., Trubchaninov S.A., Yelisyeyev D.V., Hassanein A. Dynamics of nitrogen and xenon plasma streams generated by MPC device // *Problems of Atomic Science and Techn. Ser.: Plasma Physics* (13). – 2007. – № 1. – P. 104-106.
5. Marchenko A.K., Garkusha I.E., Chebotarev V.V., Ladygina M.S., Petrov Yu.V., Solyakov D.G., Tereshin V.I., Staltsov V.V., Hassanein A., Składnik-Sadowska E. Features of plasma focus formation in different operation modes of gas-discharge magnetoplasma compressor // *Acta Technica CSAV56*. – 2011. – T113-T122.
6. Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Ladygina M.S., Marchenko A.K., Petrov Yu.V., Solyakov D.G., Tereshin V.I., Trubchaninov S.A., Tsarenko A.V., Hassanein A. Investigation of pinching discharge in MPC device operating with nitrogen and xenon gases // *Czechoslovak Journal of Physics*. – 2006. – Vol. 56 Suppl. B. – B335-B341.
7. Гаркуша И.Е., Терешин В.И., Чеботарев В.В., Соляков Д.Г., Петров Ю.В., Ладыгина М.С., Марченко А.К., Стальцов В.В., Елисеев Д.В. Характеристики разряда и динамика компрессионных плазменных потоков, генерируемых МПК компактной геометрии // *Физика плазмы*. – 2011. – Т. 37. № 11. – С. 1015-1022.
8. Соляков Д.Г., Петров Ю.В., Гаркуша И.Е., Чеботарев В.В., Ладыгина М.С., Чередниченко Т.Н., Моргаль Я.И., Кулик Н.В., Стальцов В.В., Елисеев Д.В. Формирование зоны сжатия в плазменном потоке, генерируемом магнитоплазменным компрессором // *Физика плазмы*. – 2013. – Т. 39. № 12. – С. 1099 - 1106.
9. Załoga D., Składnik-Sadowska E., Kubkowska M., Ladygina M., Malinowski K., Kwiatkowski R., Sadowski M.J., Paduch M., Zielińska E. and Makhraj V.A. Comparison of optical spectra recorded during DPF-1000U plasma experiments with gas puffing // *Nukleonika*. – 2015. – 60(2). – P. 309-314.

10. Bandura A.N., Byrka O.V., Chuvilo A.A., Garkusha I.E., Ladygina M.S., Marchenko A.K., Solyakov D.G., Yeliseyev D.V. Characteristics of plasma streams and optimization of operational regimes for magnetoplasma compressor // Problems of atomic science and technology. Ser.: Plasma Physics (17). – 2011. – № 1. – P. 68-70.
11. Składnik-Sadowska E., Czaus K., Malinowski K., Sadowski M.J., Nowakowska-Langier K., Ladygina M., Garkusha I.E. Optical emission spectroscopy of plasma produced from tungsten target irradiated within RPI-IBIS facility // Nukleonika. – 2012. – 57(2). – P. 193–196.
12. Malinowski K., Składnik-Sadowska E., Ladygina M., Jakubowski L., Sadowski M.J. Investigations of plasma discharges within Maja-PF device operated with tungsten inserts in the central electrode // PLASMA 2007 – International Conference on Research and Applications of Plasmas. 16-19 October, 2007, Greifswald, Germany. Editors: Hartfuss H-J., Dudeck M., Musielok J., Sadowski M.J. / AIP CP993, 2008, P. 357-360.
13. Ladygina M., Składnik-Sadowska E., Sadowski M.J., Czaus K., Kwiatkowski R., Malinowski K., Zebrowski J. and Garkusha I.E. Spectroscopic investigation of dense plasma streams and their interactions with CFC targets in PF-360 and RPI-IBIS facilities // Proc. 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics 16th International Congress on Plasma Physics. 2-6 July, 2012, Stockholm, Sweden / Proceedings published in an electronic version (CD issue).
14. Garkusha I.E., Chebotarev V.V., Hassanein A., Ladygina M.S., Marchenko A.K., Petrov Yu.V., Solyakov D.G., Tereshin V.I., Trubchaninov S.A., Byrka O.V. Dynamics of Xenon Plasma Streams generated by Magnetoplasma Compressor // PLASMA 2007 – International Conference on Research and Applications of Plasmas. 16 - 19 October, 2007, Greifswald, Germany. Editors: Hartfuss H-J., Dudeck M., Musielok J., Sadowski M.J. / AIP CP993, 2008, P. 341-344.
15. Ladygina M.S., Marchenko A.K., Solyakov D.G., Petrov Yu.V., Makhilaj V.A., Yeliseyev D.V., Garkusha I.E. Investigations of plasma parameters and features of compression zone formation in MPC facility using the optical and spectroscopic methods of diagnostics // Proc. of the Joint ICTP-IAEA School and Workshop on Modern Methods in Plasma Spectroscopy Trieste, Italy, 16 - 20 March, 2015 / Programs book P. 36.
16. Ladygina M.S., Składnik-Sadowska E., Sadowski M.J., Zaloga D.R., Kubkowska M., Kowalska-Strzęciwilk E., Krawczyk N., Paduch M., Garkusha I.E. and Miklaszewski R. Studies of plasma interactions with tungsten targets in PF-1000U facility // Proc. International Conference on Research and Application of Plasmas, PLASMA-2015, Warsaw, Poland, September 7-11, 2015 / P4.05 (CD issue).
17. Marchenko A.K., Ladygina M.S., Petrov Y.V., Makhilaj V.A., Garkusha I.E., Solyakov D.G., Byrka O.V., Chebotarev V.V., Aksenov N.N., Herashchenko S.S. and Astashinski V.M. Diagnostics of plasma streams and plasma-surface interaction of essentially different duration of plasma pulses // Proc. International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion Kharkiv, Ukraine, September 12-15, 2016 / Book of abstract P. 94.
18. Składnik-Sadowska E., Malinowski K., Sadowski M.J., Kubkowska M., Jakubowska K., Paduch M., Scholz M., Garkusha I.E., Ladygina M., Tereshin V.I. Optical spectroscopy of free-propagating plasma and its interaction with tungsten targets in PF-1000 facility // Contributions to Plasma Physics 51. – 2011. – № 2-3. – P. 288-292.

19. Ladygina M.S., Garkusha I.E., Marchenko A.K., Makhlai V.A., Sadowski M.J., Składnik-Sadowska E., Aksenov N.N., Tereshin V.I. Spectroscopy of plasma surface interaction in experiments simulating ITER transient events // Transactions of Fusion Science and Technology. – 2011. – Vol. 60, № 1. – P. 27-33.

АНОТАЦІЯ

Ладигіна М.С. Спектральні характеристики компресійних потоків плазми в системах типу магнітоплазмовий компресор та плазмовий фокус. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 «Фізика плазми». – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Інститут фізики плазми. – Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, 2018.

У дисертаційній роботі представлені результати експериментальних досліджень впливу початкових та граничних умов у розрядах, що пінчуються, на особливості динаміки компресійних плазмових потоків та формування області компресії при використанні робочих газів різних мас та їх сумішей в магнітоплазмовому компресорі (МПК). Також досліджено формування щільних приповерхневих шарів плазми при взаємодії потужних плазмових компресійних потоків із поверхнями деяких матеріалів. Зокрема, розвинуто спектроскопічні методи аналізу параметрів компресійної плазми різних сортів іонів у плазмових системах типу плазмовий фокус (ПФ) та МПК, досліджено динаміку щільної замагніченої плазми при використанні в якості робочих газів азоту, гелію, ксенону, аргону, дейтерію та сумішей газів різної атомної маси. Проведено аналіз умов подібності розвитку розряду та особливостей компресії плазми різних сортів іонів. Так, за допомогою спектроскопічних вимірювань визначені оптимальні початкові умови, особливості напуску газу та інші характеристики розряду для досягнення максимальних параметрів плазми та інтенсивності випромінювання у вибраному діапазоні довжин хвиль та енергій.

Ключові слова: потужні щільні плазмові потоки, замагнічена плазма, магнітоплазмовий компресор, плазмовий фокус, спектральні методи діагностики, електронна густина плазми, взаємодія плазми з поверхнею матеріалів.

ABSTRACT

Ladygina M.S. Spectral characteristics of compression plasma streams in magnetoplasma compressor and plasma focus systems. – Research Project, Manuscript copyright.

Thesis for the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.08 – Plasma physics. – National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology» Institute of Plasma Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2018.

The thesis contains the experimental results of the initial and boundary conditions influence on the peculiarities of the compression plasma flows dynamics and the compression region formation in pinch discharges of magnetoplasma compressor (MPC) with the use of working gases of various masses and their mixtures. In addition, the formation of dense near-surface plasma layers is studied at the interaction of powerful

plasma compression streams with materials surfaces. In particular, the spectroscopic methods of the compression plasma parameters of different ions species analysis in plasma focus and MPC have been developed, dynamics of dense magnetized plasma has been investigated using different working gases (nitrogen, helium, xenon, argon, deuterium) and mixtures of gases with different atomic masses are investigated. For the first time, an analysis of the similarity conditions of the discharge development and the features of the plasma compression was carried out with various sorts of ions using. Thus, the optimal initial conditions, gas injection features and other discharge characteristics were determined to achieve maximum plasma parameters and intensity of electromagnetic radiation in the selected range of wavelengths and energies using spectroscopic measurements.

The results of plasma density measurements in the compression region are in good agreement with the results of the theoretical description of compression plasma flows within the two-fluid MHD model. In particular, it was shown that in the experimental conditions the maximum density in the compression region is inversely proportional to the initial density of working gas in the accelerating channel $N_{\max} \sim 1/\sqrt{N_0}$, what corresponds to the theoretical representation. The experimentally measurements of plasma electron density in the compression zone shows a possibility to obtain dense magnetized plasma with density that reaches $N_e = (3 - 5) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

The influence of the atomic mass of background gas on the processes of plasma stream compression in the MPC was studied. A comparative analysis of plasma dynamics was performed using the «light» (nitrogen, helium) and «heavy» (argon, xenon) working gases. For the first time was established that the location of the compression zone maximum depends mainly on the initial concentration of the working gas in the interelectrode space. It was shown experimentally that with decreasing initial gas concentration (but with the maintenance of integral mass flow rate invariable), the compression region displaces in the direction from the electrodes. This result opens the possibility to control geometrical position of a compression zone what is important for finding the ways to reduce erosion of electrodes in various technological applications of pinch-discharges (plasma processing of materials, EUV lithography etc.).

In experiments the plasmadynamic systems, such as plasma focus and pulsed injector (pulsed plasma accelerator), were used to study plasma-surface interaction in experiments with materials promising for the use in fusion reactors, for example, ITER reactor tokamak. The results obtained from several facilities (PF MAJA-60, PF-360, DPF-1000 and RPI-IBIS), that differ by plasma parameters has helped to identify the features of plasma streams dynamics, depending on the initial and boundary conditions. Such data are important for establishment of the fundamental laws of dense magnetized plasma dynamics, as well as for a number of applied problems involving the use of high-energy compression plasma streams.

Spectroscopic studies of near-surface plasma and comparison of characteristics of dense plasma layers localized near the surface, with plasma parameters in the compression zone of MPC were performed. In particular, spectroscopic methods were used for finding the basic plasma parameters, to detect impurities that are evaporated and sputtered from the target surface, their ionization state and the analysis of the impurity particles dynamics in plasma.

The results obtained at spectroscopic studies of the processes of plasma interaction with perspective thermonuclear materials (CFC, W) showed a significant influence of plasma density and plasma streams energy content on the material emission intensity from the target surface.

The information obtained in experiments on interaction of dense plasma flows with materials is of great importance for solution of the thermonuclear problems connected with control fusion. In particular, the data relating to the determination and interpretation of physical processes that occur during the plasma-surface interaction, the behavior of the different target materials under plasma impact and others can be applied in further studies of the plasma influence on materials in large-scale fusion devices.

Keywords: powerful dense plasma streams, magnetized plasma, magnetoplasma compressor, spectral methods of diagnostics, plasma electron density, plasma focus, plasma-surface interaction.

АННОТАЦИЯ

Ладыгина М.С. Спектральные характеристики компрессионных потоков плазмы в системах типа магнитоплазменный компрессор и плазменный фокус. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 «Физика плазмы». – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» Институт физики плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2018.

В диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния начальных и граничных условий в пинч-разрядах на особенности динамики компрессионных плазменных потоков и формирования области компрессии при использовании рабочих газов с разными массами и их смесей в магнитоплазменном компрессоре (МПК). Исследовано формирование плотных приповерхностных слоев плазмы при взаимодействии мощных плазменных компрессионных потоков с поверхностями материалов. В частности, развиты спектроскопические методы анализа параметров компрессионной плазмы разных сортов ионов в плазменных системах типа плазменный фокус (ПФ) и МПК, исследована динамика плотной замагниченной плазмы при использовании в качестве рабочих газов азота, гелия, ксенона, аргона, дейтерия и смесей газов с разными атомными массами. Проведен анализ условий подобия развития разряда и особенностей компрессии плазмы разных сортов ионов. Таким образом, с помощью спектроскопических измерений определены оптимальные начальные условия, особенностей напуска газа и другие характеристики разряда для достижения максимальных параметров плазмы и интенсивности излучения в выбранном диапазоне длин волн и энергий.

Ключевые слова: мощные плотные плазменные потоки, замагниченная плазма, магнитоплазменный компрессор, плазменный фокус, спектральные методы диагностики, электронная плотность плазмы, взаимодействие плазмы с поверхностью материалов.