

АНОТАЦІЯ

Волкова Ю.Є. Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

У дисертаційній роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля в розрядному каналі магнітоплазмового компресора (МПК) на фундаментальні процеси в компресійних плазмових потоках. Проведено дослідження характеристик розряду, вивчено вплив зовнішнього магнітного поля на динаміку, структуру та параметри компресійних потоків плазми, на процес утворення зони стиснення.

Детально досліджено вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля в каналі МПК на основні електротехнічні параметри розряду. Проведено аналіз вольт-амперних характеристик (ВАХ) для різних значень зовнішнього поздовжнього магнітного поля під час роботи з аргоном та гелієм за різних початкових тисків. Виявлено, що вольт-амперні характеристики розряду мають нелінійну залежність від величини зовнішнього поздовжнього магнітного поля. ВАХ при вимкненому магнітному полі відрізняються від попередньо отриманих до встановлення соленоїда, що спричинено зміною геометричних параметрів розрядного каналу. ВАХ розряду з достатньою точністю можна описати степеневою функцією $U_d \sim I_d^\alpha$, що добре узгоджується з теоретичними уявленнями. За більшого початкового тиску гелію, а отже, за більшої масової витрати, напруга розряду зменшується. Цей результат підтверджується теоретичними уявленнями про те, що напруга розряду обернено пропорційна інтегральній масовій витраті. Для режимів з однаковою масовою витратою найвище значення напруги (приблизно 3,5 кВ) та миттєвої потужності (1200 МВт) розряду виявлено для режиму роботи з гелієм із початковим тиском 10 Торр із зовнішнім магнітним полем 0,4 Тл. Показано, що зі збільшенням

напруженості зовнішнього магнітного поля зростає величина радіальної складової електричного поля поблизу поверхні анода МПК.

Досліджено вплив металевої циліндричної конструкції із соленоїдом, що встановлено на розрядний канал, на електричні струми, які протікають у потоці поза межами розрядного каналу при вимкненому магнітному полі. Наявність конструкції із соленоїдом на розрядному каналі МПК призвела до зміни геометричних параметрів каналу, що, зі свого боку, спричинило зміну просторового розподілу власного магнітного поля в плазмовому потоці поза каналом та зменшення частки струму в потоці відносно повного розрядного струму. Показано, що замкнені структури вихорів струму, які утворюються в потоці за межами каналу, займають менший об'єм у просторі, ніж у випадку до встановлення конструкції із соленоїдом.

Вивчено вплив зовнішнього магнітного поля в каналі МПК на розподіл власного азимутального магнітного поля в плазмовому потоці поза розрядним каналом. Показано, що застосування зовнішнього магнітного поля приводить до зростання величини власного магнітного поля в приосьовій зоні на всій довжині плазмового потоку. Спостерігалось «витіснення» магнітного поля із приосьової частини потоку, що вказує на формування зони стиснення.

За допомогою подвійних електричних зондів проведено визначення особливостей розподілу локальної електронної температури в потоці самотисненої плазми з досить високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Показано, що сигнали подвійного електричного зонда для прямої та зворотної полярності прикладеної напруги є ідентичними, що вказує на дифузійний режим його роботи за умов, типових для розряду МПК. Отримані в такому режимі роботи значення електронної температури є заниженими через ослаблення іонного струму насичення в призондовому шарі в результаті зіткнень. Проведено вимірювання вольт-амперних характеристик подвійного електричного зонда поблизу зони стиснення плазмового потоку як за наявності зовнішнього магнітного поля, так і без його застосування. Експериментально встановлено, що функція розподілу електронів у плазмовому потоці МПК без застосування зовнішнього магнітного поля є наближеною до максвелівської.

Уперше експериментально виявлено наявність двох популяцій електронів із різними температурами, що є ознакою бімаксвелівської функції розподілу електронів, та зростання електронної температури поблизу осі плазмового потоку під час застосування зовнішнього поздовжнього магнітного поля 0,24 Тл в розрядному каналі МПК. Отримано плазмові потоки із температурою електронів (30–60) еВ, що добре узгоджується з результатами попередніх досліджень.

Проведено детальний аналіз динаміки плазмового потоку, процесів формування області стиснення та її геометричних характеристик. Отримано розподіли швидкості дрейфу, електричного струму, електричного потенціалу та сили Ампера. Показано, що в плазмовому потоці формується замкнена структура вкладених еквіпотенціалей. Під час застосування зовнішнього магнітного поля структура вкладених еквіпотенціалей зсунута на більшу відстань від виходу МПК. Плазмовий потік має складну структуру, а саме сукупності концентричних вихорів і замкнених тороїдальних струмових структур, які спостерігаються протягом усього часу його існування. Встановлено, що зовнішнє магнітне поле приводить до збільшення величини електричного струму в плазмовому потоці, змінює його просторовий розподіл і зменшує кількість струмових вихорів. Уперше показано, що за присутності зовнішнього магнітного поля (0,24 Тл) збільшується розмір зони стиснення, температура в ній зростає в шість разів, а радіальна складова сили Ампера – щонайменше в три рази.

За результатами аналізу просторового розподілу електричного струму в плазмовому потоці було виявлено структуру, подібну до нейтрального струмового шару, що формується протягом другого напівперіоду розрядного струму. У виявленій структурі, оточеній зонами плазмового потоку з протилежно спрямованими магнітними полями, спостерігається зростання густини електричного струму. За результатами аналізу експериментально отриманих розподілів електронної температури та швидкості дрейфу можна зробити висновок, що зі структури із шаром відбувається генерація електронного пучка або плазмового струменя з температурою 30 еВ. Утворення структури зі струмовим шаром без зовнішнього магнітного поля відбувається пізніше, ніж під

час його застосування. Формування подібної структури в потужних потоках плазми, генерованих квазістаціонарними плазмодинамічними системами, виявлено вперше. Наявність структури типу нейтральний струмовий шар робить перспективним використання МПК для експериментального моделювання астрофізичних явищ.

Результати проведених досліджень є важливими для вирішення широкого кола прикладних задач. Вивчені особливості процесів, що відбуваються в компресійних потоках плазми під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля, є вкрай цінними для розуміння фундаментальних властивостей компресійних течій та можуть використовуватися для оптимізації режимів роботи плазмодинамічних пристроїв для їх подальшого застосування. Отримані в дисертаційній роботі результати надають змогу застосовувати зовнішнє магнітне поле в магнітоплазмових компресорах із метою покращення компресійних властивостей потоку, що важливо для подальшого розвитку плазмових джерел вакуумного ультрафіолету для літографії нового покоління.

Результати дослідження відкривають можливість для лабораторного моделювання різноманітних процесів, у тому числі астрофізичних явищ. Більш того, вивчені аспекти впливу зовнішнього магнітного поля на параметри плазмового потоку необхідно враховувати при дослідженні взаємодії плазми з поверхнями різних матеріалів в умовах, наближених до термоядерного реактора, при розробленні плазмових технологій, покращенні систем обробки поверхонь тощо.

Ключові слова: плазмовий розряд, газорозрядна система, замагнічена плазма, діагностика плазми, динаміка плазми, параметри плазми, електронна температура, магнітне поле, електричне поле, швидкість дрейфу, плазмовий прискорювач, магнітоплазмовий компресор, нейтральний струмовий шар.

ABSTRACT

Volkova Y.Ye. Dynamics of plasma stream generated by magnetoplasma compressor with longitudinal magnetic field. Qualification scholarly paper: a manuscript. Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Specialty 105 – Applied physics and nanomaterials. – V.N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The thesis presents the results of the experimental studies of the influence of an external longitudinal magnetic field in the discharge channel of a magnetoplasma compressor (MPC) on fundamental processes in compressive plasma flows. The effect of the external magnetic field on the discharge characteristics, dynamics, structure, and parameters of compressive plasma flows, as well as on the process of the compression zone formation, was studied.

The influence of the external longitudinal magnetic field in the MPC channel on the main electrical parameters of the discharge was studied in detail. The current-voltage (I-V) characteristics for the modes of operation with argon and helium as working gases at different initial pressures were analyzed as a function of the external longitudinal magnetic field. It was found that the current-voltage characteristics of the discharge have a nonlinear dependence on the magnitude of the external longitudinal magnetic field. The I-V characteristics for the case when no magnetic field is applied differ from those obtained before the solenoid was installed. Such a difference is attributed to a change in the geometry of the discharge channel. The current-voltage characteristics can be described by a power-law function $U_d \sim I_d^\alpha$ with sufficient accuracy that shows good agreement with theoretical models. Under a higher initial pressure of helium and, therefore, at a higher mass flow rate, the discharge voltage drops. This result is supported by the theoretical notion that the discharge voltage is inversely proportional to the integral mass flow rate. For the modes of operation with the same mass flow rate, the highest value of the voltage (about 3.5 kV) and instantaneous power (1200 MW) of the discharge is found for the mode of operation with helium at an initial pressure of 10 Torr and an external magnetic field of 0.4 T. It has been found that the magnitude of the radial component of the electric field near the surface of the MPC anode increases with the magnitude of the external magnetic field.

The influence of the cylindrical metal structure with a solenoid installed on the discharge channel on the electric currents flowing outside the channel was investigated when no magnetic field was applied. The presence of the structure with a solenoid on the discharge channel of the MPC led to a change in the geometry of the channel, which, in turn, caused a change in the spatial distribution of the self-magnetic field in the plasma flow outside the channel and a decrease in the ratio of the current in the stream to the magnitude of the total discharge current. It is shown that the closed structures of the current vortices formed in the plasma stream outside the channel occupy a smaller volume than in the case before the installation of the structure with the solenoid.

The influence of the external magnetic field in the MPC channel on the distribution of the azimuthal self-magnetic field in the plasma stream outside the discharge channel was studied. Findings show that the external magnetic field imposed inside the MPC discharge channel leads to an increase in the magnitude of the self-magnetic field in the axial region along the entire length of the plasma flow. Displacement of the magnetic field from the axial part of the plasma stream that indicates the formation of a compression zone was observed.

Double electric probes were used to determine the features of the local electron temperature distribution in the self-compressed plasma flow with sufficiently high spatial and temporal resolution. The results show that the signals of the double electric probe for the direct and reverse polarity of the biasing voltage are identical, which indicates the diffusion mode of its operation under the conditions typical for the MPC discharge. The electron temperature values obtained in this mode of operation are underestimated due to the attenuation of the ion saturation current in the near-probe layer as a result of collisions. The current-voltage characteristics of the double electric probe were measured near the compression zone of the plasma stream both in the presence of an external magnetic field and without its application. It has been established experimentally that the distribution function of electrons in the plasma flow of the MPC is close to the Maxwellian when no external magnetic field is applied.

For the first time, the presence of two populations of electrons with different temperatures, which indicates a bi-Maxwellian electron distribution function, and an

increase in the electron temperature near the axis of the plasma stream have been observed when the external longitudinal magnetic field of 0.24 T was applied in the MPC discharge channel. Plasma flows with an electron temperature of (30-60) eV were obtained. This result is in good agreement with the findings of the previous studies.

A detailed analysis of the dynamics of the plasma stream, the processes of the formation of the compression zone and its geometric characteristics, drift velocity, electric current, electric potential, and Ampere's force was conducted. The results show the formation of a structure of enclosed equipotentials in the plasma flow. During the application of an external magnetic field, the configuration of the enclosed equipotentials is shifted to a greater distance from the MPC output. The plasma stream has a complex structure, including clusters of concentric vortices and closed toroidal current structures observed throughout its lifetime. The external magnetic field leads to an increase in the magnitude of the electric current in the plasma stream, changes its spatial distribution, and reduces the number of current vortices. The findings demonstrate that in the presence of an external magnetic field (0.24 T), the compression zone grows, its temperature increases sixfold, and the radial component of Ampere's force goes up at least threefold.

The analysis of the electric current distribution in the plasma stream revealed a structure similar to a neutral current sheet that forms during the second half-period of the discharge current. In the observed structure, which is surrounded by the plasma flow zones with oppositely directed magnetic fields, an increase in the electric current density was detected. The results of the analysis of the experimentally obtained electron temperature and drift velocity distributions indicate the generation of an electron beam or plasma jet with a temperature of 30 eV from the current-sheet-like structure. The formation of a structure with a current sheet without an external magnetic field occurs later than with its application. The formation of such a structure in powerful plasma flows generated by quasistationary plasmadynamic systems has been observed for the first time. The presence of a structure similar to a neutral current sheet opens an opportunity to use the MPC for the experimental modeling of astrophysical phenomena.

The outcomes of the conducted research are important for solving a wide range of problems in different applications. The studied features of the processes found in compressive plasma streams under the influence of an external longitudinal magnetic field are invaluable for the understanding of the fundamental properties of such flows and can be used to optimize the operation modes of plasmadynamic devices for their further applications. The obtained results make it possible to apply an external magnetic field in magnetoplasma compressors to improve the compressive properties of the flow, which is crucial for the further development of plasma sources of extreme ultraviolet radiation for new-generation lithography.

The results of the research open the opportunity for laboratory modeling of various processes, including astrophysical phenomena. Moreover, the studied aspects of the influence of the external magnetic field on the parameters of the plasma streams should be taken into account in the investigation of the interaction of plasma with the surfaces of various materials in conditions close to those of a fusion reactor, as well as in the development of plasma technologies, improvement of surface treatment systems, etc.

Keywords: plasma discharge, gas discharge system, magnetized plasma, plasma diagnostics, plasma dynamics, plasma parameters, electron temperature, magnetic field, electric field, drift velocity, plasma accelerator, magnetoplasma compressor, neutral current sheet.