УДК 533.9.082
МРНТИ 29.27.49

https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-3-273-280

[1]*Тажен А.Б.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3277-2086,
*e-mail: Aigerim@physics.kz
[1]Досболаев М.К.,
к.ф.-м.н., доцент, ORCID ID: 0000-0002-0724-1793,
e-mail: merlan@physics.kz
[1]Пшиков М.И.,
к.ф.-м.н., и.о. доцента, ORCID ID: 0000-0003-0706-2688,
e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com
[2]Усенов Е.А.,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7903-8674,
e-mail: yerbolat@physics.kz
[1]Рамазанов Т.С.
д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0009-0009-2301-1152,
e-mail: ramazan@physics.kz

[1]НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, г. Алматы, Казахстан
[2]Кафедра машиностроения и аэрокосмической техники, Принстонский университет,
08540, Нью-Джерси, США

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА УСТАНОВКЕ PW-7

Аннотация

В работе рассмотрены два независимых метода измерения скорости плазменного потока, создаваемого в импульсном плазменном ускорителе PW-7: метод, основанный на наблюдении и оценке величины доплеровского сдвига спектральных линий, и метод высокоскоростной видеосъемки движения плазмы. Монохроматор М833 был использован для регистрации спектра излучения плазменного потока. Высокоскоростная видеосъемка осуществлялась со скоростью 640 000 кадров/с с использованием CMOS-камеры Phantom VEO710S. Приведены результаты измерений средней скорости потока, полученные при рабочем давлении газа $2 \cdot 10^{-2}$ Торр, емкости и напряжении конденсаторной батареи 400 мкФ и 4 кВ. Полученные результаты двумя независимыми методами были сравнены между собой. Аргон использовался в качестве рабочего газа в экспериментах. Показано, что при использовании первого метода значение скорости плазменного потока составляет $12{,}5 \cdot 10^3$ м/сек, а при использовании второго метода значение скорости плазменного потока составляет $16{,}7 \cdot 10^3$ м/сек. По этим данным можно видеть, что измеренные значения скорости потока имеют небольшое расхождение. Таким образом, было установлено, что методы высокоскоростной видеосъемки и доплеровского сдвига дают в пределах ошибок измерений сопоставимые оценки скорости движения потока. С точки зрения практического применения определение значение скорости плазменного потока имеет очень большое значение.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, высокоскоростная видеосъемка, доплеровский сдвиг, плазменный поток.

Введение

Исследование плазменных потоков представляет большой интерес для разработок в области управляемого термоядерного синтеза и электрореактивных плазменных двигателей [1–5].

Одним из наиболее значимых для этих применений параметров является скорость потока плазмы. Плазменные потоки со скоростями до $\upsilon > 10^4$ м/сек можно получить в импульсных плазменных ускорителях [6–8]. Ускорение плазмы в этих устройствах осуществляется в основном за счет силы Ампера. Существуют несколько методов определения скорости плазменного потока. Некоторые из наиболее распространенных методов включают в себя зондовые [9–11], оптические [12, 13] и фотографические методы [14–16]. Настоящая работа посвящена определению направленной скорости плазменного потока, генерируемого в установке PW-7, на основе регистрации и анализа доплеровских сдвигов спектральных линий (формула 1).

$$\upsilon = c\left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0}\right) \quad (1)$$

где c – скорость света, λ_0 – длина волны покоя, $\lambda_0 - \lambda = \Delta\lambda$ – доплеровский сдвиг.

Материалы и методы

Эксперименты выполнены на установке PW-7 [17–19], принципиальная схема которой представлена на рисунке 1. Данная установка представляет собой импульсный плазменный ускоритель, состоящий из двух коаксиально расположенных медных электродов с диаметрами 5,5 см и 10,8 см. Электроды размещены в вакуумной камере, внутри которой откачивается воздух до давления 10^{-3} Торр перед началом экспериментов. После этого камера заполняется аргоном до рабочего давления $2{\cdot}10^{-2}$ Торр. Источником питания ускорителя служит конденсаторная батарея, емкость которой и зарядовое напряжение составляют 400 мкФ и 4 кВ. Для исследования направленных потоков плазмы установка оснащена диагностическими окнами, установленными на боковой и торцевой стенках вакуумной камеры.

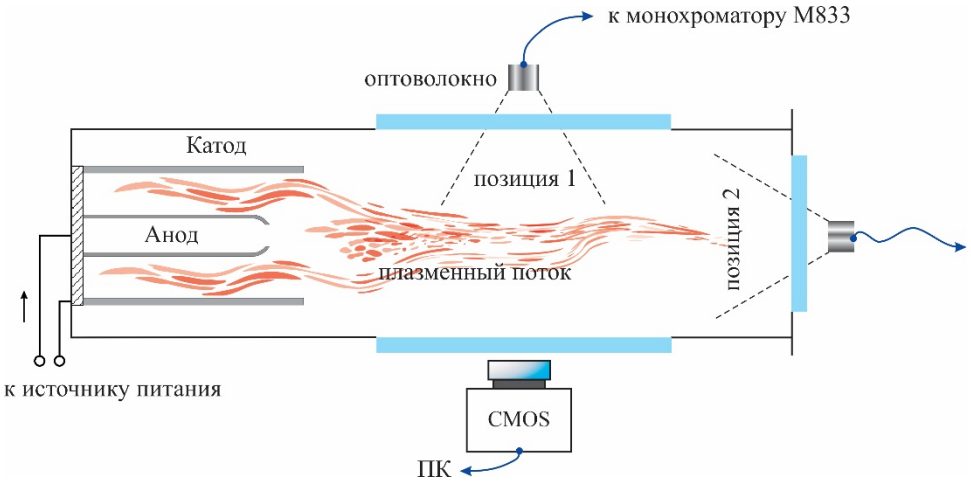


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки (импульсного плазменного ускорителя)

Для регистрации эмиссионных спектров плазменного потока используется монохроматор с высокой разрешающей способностью M833 [20]. Измерение спектров проводилось через боковое окошко (рисунок 1, позиция 1 – перпендикулярно плазменному потоку) и с торцевой стороны ускорителя (позиция 2 – вдоль направления ускорения плазмы). Для идентификации спектральной линии иона аргона монохроматор настроен на длину волны 480.6 нм. Частота штрихов решетки – 1800 штр/мм. Ширина входной щели и время экспозиции монохроматора установлены 20 мкм и 1 мс для получения оптимального соотношения оптического сигнала к

шуму и регистрации излучения в течение всего времени жизни плазмы. Зарегистрированные спектры обрабатывались с помощью программного обеспечения SolarLS LAB и программы «OriginPro 8». Расшифровка спектров осуществлялась с использованием спектральной базы данных NIST. Для фокусировки и передачи плазменного излучения в монохроматор используется оптоволоконный детектор.

Запуск монохроматора производится синхронно с плазменным ускорителем. Для этого используется генератор импульсов Berkeley Nucleonics Model 577 (амплитуда и длительность синхронизирующего импульса составляют 5 В и 12 мкс). Монохроматор, блок дистанционного управления и синхронизации ускорителя размещаются в отдельное экранированное помещение.

Результаты и обсуждения

Спектральные линии, зарегистрированные с боку и торца ускорителя, в экспериментах с аргоном представлены на рисунке 2. Доплеровский сдвиг для линии излучения, полученной перпендикулярно потоку, предполагается нулевым. В таком случае длину волны этой линии можно считать опорной (рисунок 2, красная сплошная линия). Как мы видим, при детектировании излучения вдоль направления ускорения плазмы (позиция 2) эта линия смещается в сторону коротких длин волн. Таким образом, в настоящем эксперименте величина доплеровского сдвига составит порядка $\Delta\lambda \approx \cdot$ 0,02 нм. По этим данным оценивалась скорость движения потока аргоновой плазмы. На основе формулы (1) она составляет порядка $12{,}5 \cdot 10^3$ м/сек.

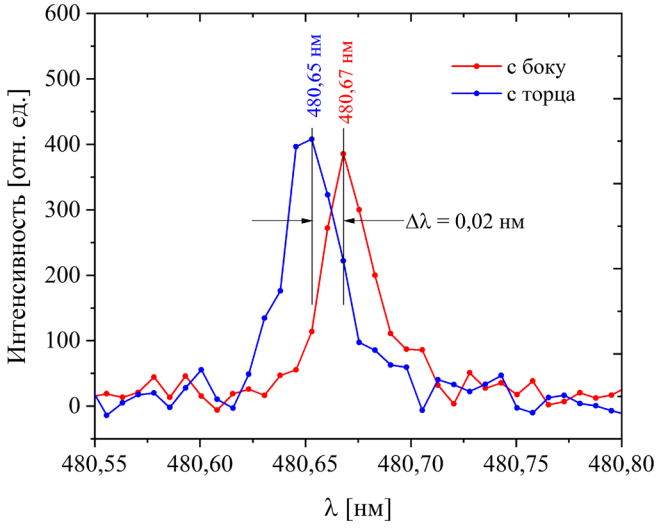


Рисунок 2 – Доплеровский сдвиг спектральной линии ArII 480,60 нм

Следует также отметить, что значение скорости, рассчитанное исходя из эффекта Доплера, сравнивалось с результатами высокоскоростной видеосъемки плазменного потока. Съемка осуществляется с помощью видеокамеры Phantom VEO710S с диагностического окна, расположенного на боковой стороне вакуумной камеры на расстоянии 22 см. Поскольку поток плазмы имеет высокую динамичность, частота и разрешение видеокамеры составляют 640 000 кадров/с и 128×32 пикселей. На рисунке 3 приведены изображения плазменного потока.

Таким образом, скорость потока аргоновой плазмы, определенная методом высокоскоростной видеосъемки (по отношению смещения плазменного потока на двух последовательных изображениях к промежутку времени между этими изображениями) составила по-

рядка $16{,}7 \cdot 10^3$ м/сек. Отсюда видно, что различие между значениями скорости, оцененными двумя независимыми методами, небольшое, что свидетельствует о малой расходимости и достоверности полученных нами результатов измерений.



Рисунок 3 – Высокоскоростная видеосъемка потока аргоновой плазмы.
Частота – 640000 кадров/с, минимальное время экспозиции – 1,1 мкс.
Направление потока – слева направо. Интервал между кадрами – 1,56 мкс.

Заключение

Использование двух независимых позволило определить одну из важнейших характеристик – скорости потока аргоновой плазмы, генерируемого в импульсном плазменном ускорителе PW-7. Показано, что скорость потока плазмы, определенная методом высокоскоростной видеосъемки, превосходит значение скорости, определенное методом доплеровского сдвига спектральных линий. Это обусловлено тем, что высокоскоростная видеосъемка позволяет проводить только качественное исследование и значение скорости потока, определенное с ее помощью, можно считать приближенным. Также следует отметить, что видеокамера фиксирует только изменение яркости плазменного свечения. Поскольку это свечение может быть сильно неоднородным, рассчитанная скорость оказывается неточной. Тем не менее полученные данные расходятся несущественно. Таким образом, применение двух методов в совокупности позволяет значительно повысить достоверность результатов измерений скорости потока аргоновой плазмы.

Благодарность/источник финансирования

Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта No BR18574080 «Исследование фундаментальных и прикладных проблем физики плазмы, плазмоподобных сред для целей решения задач современной энергетики и получения новых функциональных материалов».

ЛИТЕРАТУРА

1 Linsmeier Ch., Unterberg B., Coenen J.W., Doerner R.P., Greuner H., Kreter A., Linke J., Maier H. Material testing facilities and programs for plasma-facing component testing // Nucl. Fusion. – 2017. – Vol. 57. – P. 092012. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa4feb

2 Kartasheva A.A., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Muravyeva E.A., Lukyanov K.S., Klimov N.S. Experimental investigation of the characteristics of the plasma flow generated in quasi-stationary plasma accelerator using optical methods // Phys. Plasmas. – 2024. – Vol. 31. – P. 043107. https://doi.org/10.1063/5.0198341.

3 Ling W.Y.L., Zhang S., Fu H., Huang M., Quansah J., Liu X., Wang N. A brief review of alternative propellants and requirements for pulsed plasma thrusters in micropropulsion applications // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33. – P. 2999–3010. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.024.

4 Ou Y., Wu J., Cheng Y., Zhang Y., Che B. Design and performance of a micro-pulsed plasma thruster used in miniaturized satellites // Advances in Space Research. – 2024. – Vol. 74. – P. 1741–1750. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.039.

5 Lerner E.J., Hassan S.M., Karamitsos-Zivkovic I., Fritsch R. Focus Fusion: Overview of Progress Towards p-B11 Fusion with the Dense Plasma Focus // Journal of Fusion Energy. – 2023. – Vol. 42. – P. 1–18. https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z.

6 Ladygina M.S., Petrov Yu.V., Yeliseev D.V., Makhlai V.A., Kulik N.V., Staltsov V.V. Parameters of hydrogen plasma streams in QSPA-M and their dependence on external magnetic field // Problems of atomic science and technology. – 2021. – No. 1. – P. 61–64. https://doi.org/10.46813/2021-131-061

7 Borthakur S., Ahmed A., Singha S., Neog N.K., Borthakur T.K. Role of gas flow on plasma stream dynamics in a pulsed plasma accelerator // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Vol. 168. – P. 112400. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112400

8 Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Moldabekov Zh.M., Useinova B.M. Calculation and Analysis of Electrophysical Processes in a High-Power Plasma Accelerator with an Intrinsic Magnetic Field // Technical Physics. – 2019. – Vol. 64. – P. 342–347. https://doi.org/10.1134/S1063784219030277.

9 Talukdar N., Ahmed A., Borthakur S., Neog N.K., Borthakur T.K., Ghosh J. Measurement of plasma stream velocity in a pulsed plasma accelerator // Phys. Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – P. 062711. https://doi.org/10.1063/1.5092267.

10 Dosbolayev M.K., Igibayev Zh.B., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. Preliminary Study of the Solid-State Pulsed Plasma Thruster Model with Graphite as a Propellant // Plasma Physics Reports. – 2022. – Vol. 48. – P. 263–270. https://doi.org/10.1134/S1063780X22030047.

11 Al-Hawat S. Axial velocity measurement of current sheath in a plasma focus device using a magnetic probe // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Vol. 32. – P. 764–769. https://doi.org/10.1109/TPS.2004.826119.

12 Yaroshevskaya A.D., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Litvinenko Yu.I. Determination of Plasma Flow Velocity with Time Resolution Based on the Doppler Effect // Plasma Physics Reports. – 2024. – Vol. 50. – P. 689–696.

13 Ярошевская А.Д., Малютин А.Ю., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Карташева А.А. XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Москва, 14–18 марта, 2022). – С. 164.

14 Losada U., Manzanares A., Balboa I., Silburn S., Karhunen J., Carvalho P.J., Huber A., Huber V., Solano E.R., de la Cal E. Observations with fast visible cameras in high power Deuterium plasma experiments in the JET ITER-like wall tokamak // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Vol. 25. – P. 100837. https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100837.

15 Ананьев С.С., Крауз В.И., Мялтон В.В., Харрасов А.М. Исследование формирования плазменных потоков, генерируемых в плазмофокусном разряде // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40. – С. 21–35. https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-1-21-35.

16 Nawaz A., Lau M., 32nd Int. Electric Propulsion Conf (Wiesbaden, 11–15 September, 2011). – P. 1–13.

17 Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Generation and Diagnostics of Pulse Plasma Flows // Plasma Physics Reports. – 2020. – Vol. 46. – P. 465–471. https://doi.org/10.1134/S1063780X20040121.

18 Dosbolayev M.K., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Ussenov Ye.A. Investigation of dust formation during changes in the structural and surface properties of plasma-irradiated materials // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 33. – P. 101300. https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101300.

19 Dosbolayev M.K., Tazhen A.B., Kholmirzayev A.N., Ussenov Ye.A., Ramazanov T.S. Studies of the formation and distribution of cracks and various defects on the heated tungsten plate surface during pulsed plasma flux impact // Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Vol. 37. – P. 101540. https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101540.

20 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Pulsed plasma flow diagnostics // Recent Contributions to Physics. – 2022. – Vol. 81. – P. 35–39. https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v81.i2.05.

REFERENCES

1 Linsmeier Ch., Unterberg B., Coenen J.W., Doerner R.P., Greuner H., Kreter A., Linke J. Maier H. Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 092012. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa4feb.

2 Kartasheva A.A., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Muravyeva E.A., Lukyanov K.S., Klimov N.S. Phys. Plasmas, 2024, vol. 31, p. 043107. https://doi.org/10.1063/5.0198341.

3 Ling W.Y.L., Zhang S., Fu H., Huang M., Quansah J., Liu X., Wang N. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, vol. 33, pp. 2999–3010. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.024.

4 Ou Y., Wu J., Cheng Y., Zhang Y., Che B. Advances in Space Research, 2024, vol. 74, pp. 1741–1750. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.039.

5 Lerner E.J., Hassan S.M., Karamitsos-Zivkovic I., Fritsch R. Journal of Fusion Energy, 2023, vol. 42, pp. 1–18. https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z.

6 Ladygina M.S., Petrov Yu.V., Yeliseev D.V., Makhlai V.A., Kulik N.V., Staltsov V.V. Problems of atomic science and technology, 2021, no. 1, pp. 61–64. https://doi.org/10.46813/2021-131-061.

7 Borthakur S., Ahmed A., Singha S., Neog N.K., Borthakur T.K. Fusion Engineering and Design, 2021, vol. 168, p. 112400. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112400.

8 Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Moldabekov Zh.M., Useinova B.M. Technical Physics, 2019, vol. 64, pp. 342–347. https://doi.org/10.1134/S1063784219030277.

9 Talukdar N., Ahmed A., Borthakur S., Neog N.K., Borthakur T.K., Ghosh J. Phys. Plasmas, 2019, vol. 26, p. 062711. https://doi.org/10.1063/1.5092267.

10 Dosbolayev M.K., Igibayev Zh.B., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. Plasma Physics Reports, 2022, vol. 48, pp. 263–270. https://doi.org/10.1134/S1063780X22030047.

11 Al-Hawat S. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, vol. 32, pp. 764–769. https://doi.org/10.1109/TPS.2004.826119.

12 Yaroshevskaya A.D., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Litvinenko Yu.I. Plasma Physics Reports, 2024, vol. 50, pp. 689–696.

13 Yaroshevskaya A.D., Malyutin A.Yu., Podkovyrov V.L., Gutorov K.M., Kartasheva A.A. XLIX International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Moscow, 14–18 March, 2022), p. 164. [in Russian].

14 Losada U., Manzanares A., Balboa I., Silburn S., Karhunen J., Carvalho P.J., Huber A., Huber V., Solano E.R., de la Cal E. Nuclear Materials and Energy, 2020, vol. 25, p.100837. https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100837.

15 Ananyev S.S., Krauz V.I., Myalton V.V., Kharrasov A.M. VANT. Ser. Termoyadernyi sintez, 2017, vol. 40, pp. 21–35. [in Russian]. https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-1-21-35.

16 Nawaz A., Lau M. 32nd Int. Electric Propulsion Conf (Wiesbaden, 11–15 September, 2011), pp. 1–13.

17 Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Plasma Physics Reports, 2020, vol. 46, pp. 465–471. https://doi.org/10.1134/S1063780X20040121.

18 Dosbolayev M.K., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Ussenov Ye.A. Nuclear Materials and Energy, 2022, vol. 33, p. 101300. https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101300.

19 Dosbolayev M.K., Tazhen A.B., Kholmirzayev A.N., Ussenov Ye.A. Ramazanov T.S., Nuclear Materials and Energy, 2023, vol. 37, p. 101540. https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101540.

20 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Recent Contributions to Physics, 2022, vol. 81, pp. 35–39. https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v81.i2.05.

[1]*Тәжен Ә.Б.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3277-2086,
*e-mail: Aigerim@physics.kz
[1]Досболаев М.Қ.,
ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID: 0000-0002-0724-1793,
e-mail: merlan@physics.kz
[1]Пшиков М.И.,
ф.-м.ғ.к., доцент м.а., ORCID ID: 0000-0003-0706-2688,
e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com
[2]Үсенов Е.А.,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7903-8674,
e-mail: yerbolat@physics.kz
[1]Рамазанов Т.С.
ф.-м.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0009-0009-2301-1152,
e-mail: ramazan@physics.kz

[1]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Алматы қ., Қазақстан
[2]Машина жасау және аэроғарыштық инженерия кафедрасы, Принстон университеті,
08540, Нью-Джерси қ., АҚШ

PW-7 ҚОНДЫРҒЫСЫНДАҒЫ ИМПУЛЬСТІК ПЛАЗМАЛЫҚ АҒЫННЫҢ ЖЫЛДАМДЫҒЫН ӨЛШЕУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста PW–7 импульстік плазмалық үдеткіште пайда болатын плазмалық ағынның жылдамдығын өлшеудің екі тәуелсіз әдісі қарастырылған, олар: спектрлік сызықтардың доплерлік ығысуын бақылау мен бағалауға негізделген әдіс және плазманың қозғалысын жоғары жылдамдықты видеокамераға түсіру әдісі. Плазмалық ағынның сәулелену спектрін тіркеу үшін М833 монохроматоры қолданылды. Жоғары жылдамдықты бейнетүсірілім 640000 кадр/с жылдамдықпен Phantom VEO710S CMOS-камерасының көмегімен жүзеге асырылды. Жұмыс газының қысымы – $2 \cdot 10^{-2}$ Торр, конденсатор батареясының сыйымдылығы мен кернеуі – 400 мкФ және 4 кВ болғандағы ағынның орташа жылдамдығының өлшеу нәтижелері келтірілген. Екі тәуелсіз әдіспен алынған нәтижелер бір-бірімен салыстырылды. Аргон жұмыс газы ретінде экспериментте қолданылды. Бірінші әдісті қолданып анықталған плазма ағынының жылдамдығы $12{,}5 \cdot 10^3$ м/сек, ал екінші әдісті қолданып анықталған плазма ағынының жылдамдығы $16{,}7 \cdot 10^3$ м/сек құрады. Бұл деректерден өлшенген жылдамдықтардың мәндерінде болмашы айырмашылықтың бар екендігін көруге болады. Осылайша өлшеу қателіктері шегінде жоғары жылдамдықты видеокамераның және доплерлік ығысу әдісімен өлшенген ағын жылдамдықтарының мәндері бір-біріне жуық болатындығы анықталды. Плазмалық ағынның жылдамдығын анықтаудың маңызы оның практикалық қолданылуы тұрғысынан алғанда өте жоғары болып табылады.

Тірек сөздер: импульстік плазмалық үдеткіш, жоғары жылдамдықты бейнетүсірілім, доплерлік ығысу, плазмалық ағын.

[1]*Tazhen A.B.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3277-2086,
*e-mail: Aigerim@physics.kz
[1]Dosbolayev M.K.,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0002-0724-1793,
e-mail: merlan@physics.kz
[1]Pshikov M.I.,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Acting Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0003-0706-2688,
e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com
[2]Usenov E.A.,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7903-8674,
e-mail: yerbolat@physics.kz
[1]Ramazanov T.S.
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
ORCID ID: 0009-0009-2301-1152,
e-mail: ramazan@physics.kz

[1]Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Almaty, Kazakhstan
[2]Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University,
08540, NJ, USA

MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF PULSED PLASMA FLOW AT THE PW-7 INSTALLATION

Abstract

The paper considers two independent methods for measuring the velocity of the plasma flow generated in the PV-7 pulsed plasma accelerator: a method based on observation and evaluation of the Doppler shift of spectral lines, and a method of high-speed visualization of plasma motion. To record the plasma flow radiation spectrum, a monochromator M833 was used. High-speed video recording was carried out at 640,000 fps using a Phantom VEO710S CMOS camera. The results of measurements of the average flow velocity obtained at a working gas pressure of $2 \cdot 10^{-2}$ Torr, capacitance and voltage of the capacitor bank of 400 μF and 4 kV are presented. The results obtained by two independent methods were compared with each other. Argon was used as the working gas in the experiments. It is shown that the value of the plasma flow velocity estimated by the first method is 12.5 m/s, and the value of the plasma flow velocity estimated by the second method is 16.7 m/s. From these data the measured flow velocity values have a small discrepancy. Thus, it has been established that high-speed video recording and Doppler shift methods make it possible to obtain comparable estimates of flow velocity within the measurement errors. Determining the magnitude of the plasma flow velocity is of great practical importance.

Key words: pulsed plasma accelerator, high-speed video recording, Doppler shift, plasma flow.

Дата поступления статьи в редакцию: 26.08.2024