

Инжектор плазменного потока на основе открытого коаксиального СВЧ-резонатора

А. А. Балмашнов, Н. Б. Бутко, А. В. Калашников, В. П. Степин,
С. П. Степина, А. М. Умнов

Установлена возможность применения открытого коаксиального СВЧ-резонатора, как элемента инжектора потока плазмы с ускоренными ионами. Представлены схема плазменного инжектора, состоящего из открытого коаксиального резонатора и дополнительного кольцевого электрода, а также характерные зависимости спектров энергии ионной компоненты плазмы от потенциала на кольцевом электроде для фиксированных значений массового расхода газа (аргон) и вводимой в резонатор СВЧ-мощности.

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный СВЧ-резонатор.

Ссылка: Балмашнов А. А., Бутко Н. Б., Калашников А. В., Степин В. П., Степина С. П., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 17.

Reference: A. A. Balmashnov, N. B. Butko, A. V. Kalashnikov, V. P. Stepin, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, Applied Physics, No. 3, 17 (2020).

Введение

Разработка инжекторов потоков плазмы, ускорение ионов в которых осуществляется безэлектродным методом, представляет определенный интерес ввиду их высокой надежности, что определяет широкую область применения и, в частности, в области космической техники. При этом еще одним из факторов определяющим надежность инжектора является способ обеспечения равенства токов электронной и ионной компонент плазмы. Так в двигателях коррекции легких космических аппаратов, например СПД [1, 2], используют

Балмашнов Александр Александрович, профессор, д.т.н.

Бутко Наталия Борисовна, доцент, к.ф.-м.н.

Калашников Андрей Владимирович, н.с.

Степин Вячеслав Павлович, студент.

Степина Светлана Петровна, доцент, к.ф.-м.н.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент, к.ф.-м.н.

Институт физических исследований и технологий РУДН.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

E-mail: abalmashnov@gambler.ru

Статья поступила в редакцию 02 апреля 2020 г.

© Балмашнов А. А., Бутко Н. Б., Калашников А. В., Степин В. П., Степина С. П., Умнов А. М., 2020

сторонние источники электронов, что влияет на временной ресурс их работы. Очевидно, повышение надежности инжекторов может быть достигнуто одновременной экстракцией из области формирования плазмы как ионной, так и электронной компонент. Решение этой проблемы может заключаться в создании условия, при котором нагретые на ионном циклотронном резонансе поперечно горячие ионы транспортируются в область неоднородного магнитного поля, где осуществляется их ускорение, что приводит к возникновению амби-полярного потенциала, обеспечивающего экстракцию электронов [3]. Также существенными факторами, определяющими работу инжекторов, являются их энергетическая и газовая эффективности, что показывает преимущество использования резонансных механизмов при формировании плазмы и, в частности, ЭЦР. В настоящее время в лаборатории физики плазмы ИФИТ РУДН начаты работы по изучению возможности создания инжектора плазмы, ускорение частиц которой осуществляется безэлектродным образом. Одним из изучаемых вариантов является инжектор

плазменного потока на основе открытого коаксиального резонатора, отличающегося от описанных в работе [4] профилем стационарного магнитного поля и способом организации постоянного электрического поля. Ранее проведенные экспериментальные исследования [5] параметров плазмы, формируемой в узком коаксиальном СВЧ-резонаторе с сетчатыми электродами в режиме реализации электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в аксиально-симметричном магнитном поле показали наличие оптимальных условий (давление рабочего газа, вводимая СВЧ-мощность), при которых концентрация заряженных частиц в потоке плазмы может превышать критическое значение для используемой частоты СВЧ-поля $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад/с, а расчетная величина ионного тока при вводимой в резонатор СВЧ-мощности $P = 20$ Вт и массовом расходе газа (Ar) $\dot{m} = 0,2$ мгр/с составляла 44 мА.

Целью данной работы являлось демонстрация возможности создания инжектора потока плазмы с ускоренными ионами на основе открытого коаксиального СВЧ-резонатора.

Постановка задачи и метод ее решения

Задача исследований заключалась в изучении зависимости спектра энергии ионной компоненты плазмы от условий эксперимента с целью демонстрация возможности создания потока плазмы с ускоренными ионами в открытом коаксиальном СВЧ-резонаторе.

Инжектор (рис. 1) состоит из открытого цилиндрического коаксиального СВЧ-резонатора (1), диаметром 5,2 см, и цилиндрического электрода (2), потенциал на котором (V) мог варьироваться. Ввод рабочего газа осуществлялся в радиальном направлении через отверстие, расположенное на цилиндрической стенке резонатора. В работе использовался магнетронный генератор (М-107) со стабилизированным источником питания ($\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад/с). СВЧ-мощность по коаксиальной линии подавалась на осевой электрод резонатора (3), диаметром 0,4 см. Коэффициент стоячей волны ненагруженной системы составлял 1,1, а в условиях разряда не превышал 1,05. Азимутально-симметричное стационарное магнитное поле создавалось неодимовыми кольцевыми магнитами (4) диаметром

5 см.

Распределения магнитного и СВЧ-электрического полей, представленные ранее в работе [5], определяли расположение азимутально-симметричной области ЭЦР-взаимодействия в цилиндрическом резонаторе [5] (5 на рис. 1), которая находилась на расстоянии $R_c = (1,6 \pm 0,2)$ см от его оси и $Z_c = (0,5 \pm 0,2)$ см от его торцевой стенки. Диагностика параметров плазменного потока осуществлялась дискообразным электродом (диаметр 6 см), электрическим зондом (диаметр активной части зонда 0,2 см) и пятисеточным электростатическим анализатором энергии заряженных частиц. Влиянием постоянного магнитного и СВЧ-электрического полей при обработке результатов измерений пренебрегалось. В работе использовался турбомолекулярный насос. Массовый расход рабочего газа рассчитывался по величине давления в вакуумной системе и производительности используемого насоса. Давление измерялось традиционным образом. В качестве рабочего газа использовался аргон.

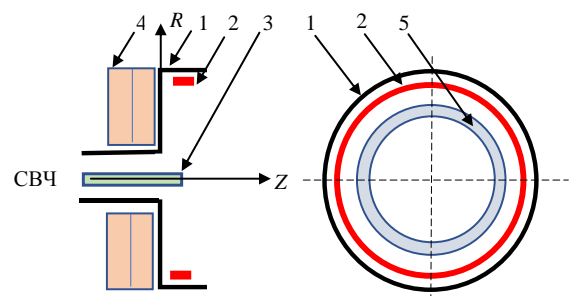


Рис. 1. Схема источника плазмы: 1 – корпус цилиндрического резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – центральный электрод коаксиального резонатора; 4 – кольцеобразные магниты; 5 – область ЭЦР-взаимодействия.

Полученные результаты и их обсуждение

Установлены режимы работы инжектора (диапазоны массового расхода рабочего газа $\dot{m} = (0,30-0,80)$ мгр/с, вводимой СВЧ-мощности $P = (20-35)$ Вт, потенциалов на цилиндрическом электроде $V = (300-500)$ В), при которых плавающий потенциал в потоке плазмы, измеряемый дискообразным электродом, расположенным на расстоянии 3 см от него находился в интервале от -5 В до +5 В, что указывает на степень равенства токов электронной и ионной компонент плазмы, и отсут-

ствует ЭЦР-разряд в коаксиальной линии. Получены зависимости величины ионного тока в цепи коллектора анализатора (I_i), расположенного на расстоянии 15 см от инжектора, в режиме полного запираания электронной ком-

поненты плазмы для $V = 380$ В от массового расхода газа (\dot{m}) для различных значений СВЧ-мощности вводимой в инжектор (P) (рис. 2).

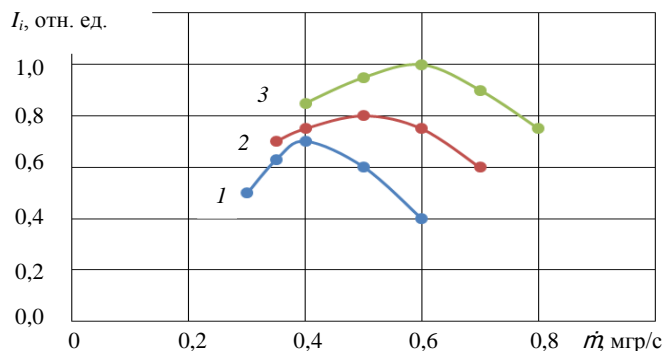


Рис. 2. Зависимости ионного тока в цепи коллектора анализатора (I_i , отн. ед.) в режиме полного запираания электронной компоненты плазмы для потенциала на цилиндрическом электроде $V = 380$ В от массового расхода газа (\dot{m}) для различных значений СВЧ-мощностей поступающих в резонатор (P). 1 – $P = 25$ Вт; 2 – $P = 30$ Вт; 3 – $P = 35$ Вт.

На рис. 3 представлены зависимости энергетических спектров ионной компоненты плазмы от потенциала на цилиндрическом электроде для режима работы инжектора, соответствующего $\dot{m} = 0,52$ мг/с, $P = 30$ Вт. При обработке результатов было учтено влия-

ние потенциалы плазмы на энергию ионной компоненты. Измерение потенциала плазмы осуществлялось одиночным зондом, расположенным вблизи коллиматора анализатора. Величина потенциала плазмы не превышала +50 В.

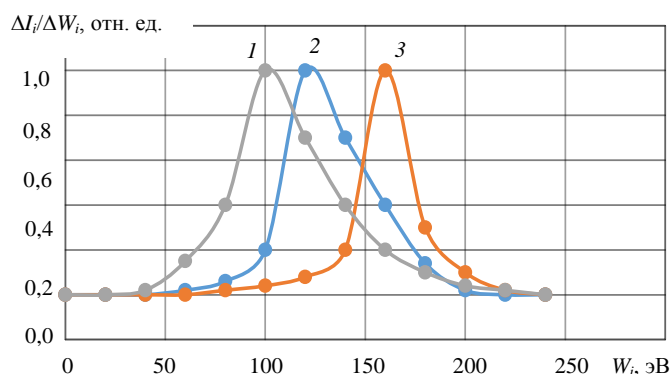


Рис. 3. Зависимость энергетического спектра ионов ($\Delta I_i / \Delta W_i$, отн. ед.) от потенциала на цилиндрическом электроде (V). Массовый расход газа $\dot{m} = 0,52$ мг/с, СВЧ-мощность $P = 30$ Вт. 1 – $V = 300$ В; 2 – $V = 380$ В; 3 – $V = 500$ В.

Заключение

Экспериментально установлена возможность применения открытого коаксиального резонатора для создания скомпенсированным по электронному и ионному токам потока плазмы, энергия ионной компоненты в котором может варьироваться изменением потенциала на цилиндрическом электроде. Предполагаем, что ускорение частиц плазмы связано с их азимутальным дрейфом в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях реализуемых в коаксиальном резонаторе.

Результаты работы могут представлять практический интерес ввиду возможности их использования при разработке компактных

плазменных инжекторов.

Публикация подготовлена при поддержке программы РУДН «5-100» и при частичной поддержке гранта РФФИ 18-29-21041.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гориков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2009.
2. Ким В. П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
3. Чернов Г. Е., Соловейчик М. М., Романов В. М., Афанасьева Е. М. // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 3 (18). С. 306.
4. Packan D. ECR Plasma Thruster development at

Onera // EPIC Workshop, 25–28 November 2014, Brussel. Успехи прикладной физики 2014.Т. 2. № 3. С. 224.
5. Балмашинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М. //

PACS: 52.50.Dg, 52.75.Di, 52.80.Pi

Plasma flow injector based on an open coaxial microwave resonator

A. A. Balmashnov, N. B. Butko, A. V. Kalashnikov, V. P. Stepin, S. P. Stepina,
and A. M. Umnov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6 Mikleho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia

Received April 02, 2020

The possibility of using an open coaxial microwave resonator as an element of an injector of a plasma flow with accelerated ions has been established. A diagram of a plasma flow injector consisting of an open coaxial resonator and an additional ring electrode is presented. The characteristic dependences of the energy spectra of the plasma ion component on the potential at the ring electrode for fixed values of the mass flow of gas (argon) and the microwave power input into the resonator are obtained.

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, coaxial microwave resonator.

REFERENCES

1. O. A. Gorshkov, V. A. Muravlev, and A. A. Shagaida, *Hall and ion plasma engines for spacecraft* (Mashinostroenie, Moscow, 2009) [in Russian].
2. V. P. Kim, *Journal of Technical Physics*. **85** (3), 45 (2015).
3. G. E. Chernov, M. M. Soloveichik, V. M. Romanov, and E. M. Afanasieva, *Alleia nauki* **1**, No. 3(18), 306 (2018).
4. D. Packan, ECR Plasma Thruster development at Onera, EPIC Workshop, 25–28 November 2014, Brussel.
5. A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, A. M. Umnov, *Advances in Applied Physics (Uspekhi Prikladnoi Fiziki)*. **2**, 3, 24 (2014).