

УДК 533.9.07

Параметры ЭЦР-плазмы, формируемой в узком коаксиальном резонаторе плазменного инжектора CERA-RI-2

А.А. Балмашинов, С.П. Степина, А.М. Умнов

Представлены результаты экспериментального исследования параметров плазмы, формируемой в узком коаксиальном резонаторе инжектора CERA-RI-2. Определены зависимости газовой и энергетической эффективности формирования ионного потока от массового расхода рабочего газа – Ar.

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

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный резонатор, газовая эффективность, энергетическая эффективность.

Введение

Источники плазмы на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) в настоящее время имеют широкую область практического использования. Их конструктивные особенности определяются конкретными процессами, для реализации которых они разрабатываются, и связаны с использованием различных конфигураций магнитных полей и типов СВЧ-колебаний, что позволяет локализовать области генерации заряженных частиц, их ускорение, накопление, характер пространственного распределения и транспортировку.

Одной из задач, решению которой в настоящее время посвящены исследования в ряде лабораторий мира является создание плазменных ЭЦР-двигателей для различного класса космических аппаратов (плазменных инжекторов) [1]. В последнее время для коррекции орбит легких космических аппаратов особое внимание уделяется разработке систем, в которых ЭЦР-разряд реализуется в коаксиальных резонаторах экстракция ионной компоненты из которых может осуществляться как системой электродов [2], так и применением магнитного сопла [3]. Преимущество использования коаксиальных резонаторов заключается в их компактности, определяющей не только массу инжектора, но и его энергетическую и газовую эффективность.

Параметры плазменного потока существенно зависят от электродинамических характеристик используемого ЭЦР-источника плазмы, исследованию которого посвящена данная работа. Ранее, в работе [4], нами были представлены результаты тестовых испытаний инжектора CERA-RI состоящего из коаксиального резонатора, постоянное магнитное поле в котором обеспечивало ЭЦР-

взаимодействие в азимутально симметричной области вблизи его торцевой стенки и двух сетчатых электродов системы экстракции ионной компоненты. В представляемой работе геометрия источника плазмы изменена, а именно, уменьшен диаметр осевого электрода резонатора и его высота, а также смещена область ЭЦР-взаимодействия в сторону системы экстракции.

Цель работы – определить зависимость энергетической и газовой эффективности модернизированного ЭЦР-источника плазмы инжектора CERA-RI-2 от массового расхода рабочего газа – Ar.

Постановка задачи и метод ее решения

Максимальные значения газовой и энергетической эффективностей инжекторов плазмы определяются электродинамическими характеристиками используемых источников плазмы. В связи с этим нами были проведены экспериментальные исследования по определению этих величин в условиях имитации экстракции ионной компоненты плазмы в разрабатываемом нами плазменном ЭЦР-инжекторе CERA-RI-2.

Схема инжектора CERA-RI-2 представлена на рис. 1. Он состоит из цилиндрического коаксиального резонатора (1), одна из стенок которого представляет собой систему их двух сетчатых электродов (C1, C2) способных перемещаться вдоль оси резонатора. Потенциалы на электродах относительно корпуса источника могут варьироваться. Азимутально симметричное стационарное магнитное поле создается кольцевыми магнитами (2). Профиль и напряженность магнитного поля в источнике измерялись датчиком Холла SS9 4A1F. В работе использовался магнетронный генератор (M-107, $f = 2,45$ ГГц). СВЧ-мощность поступала на осевой электрод резонатора (3), который одновременно использовался для ввода рабочего газа в разрядную камеру в радиальном направлении. Поступающая и отраженная СВЧ-мощности измерялись с помощью направленного ответвителя прибором Я2М-66. Геометрические размеры ненагруженного резонатора, настроенного на частоту СВЧ-генератора, следующие: диаметр – 7,8 см, высота – 1,1 см.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.

Степина Светлана Петровна, доцент.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент.

Российский университет дружбы народов (РУДН).

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

Тел.: 8 (495) 9550923. E-mail: abalmashnov@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2014 г.

© Балмашинов А.А., Степина С.П., Умнов А.М., 2014

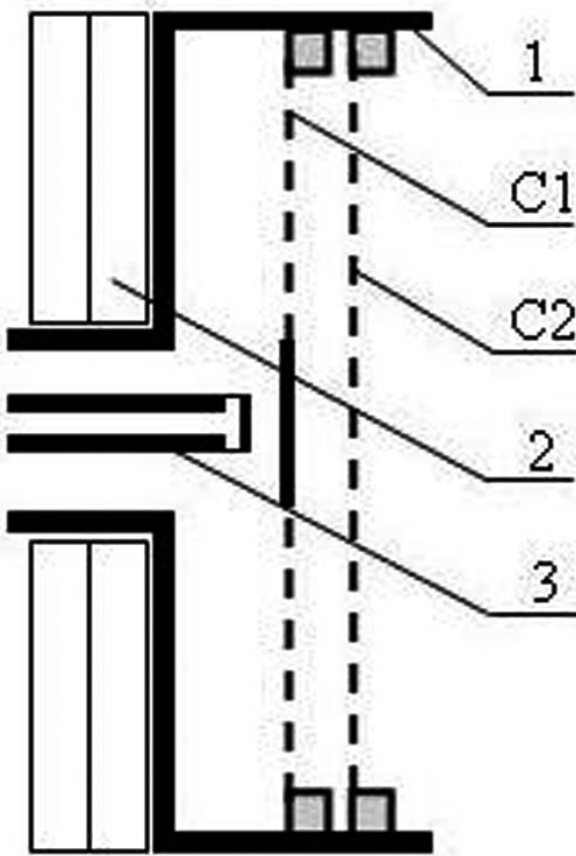


Рис. 1. Схема инжектора CERA-RI-2: 1 – коаксиальный резонатор, 2 – кольцевые магниты, 3 – осевой электрод резонатора, C1 и C2 – сетчатые электроды имитирующие систему экстракции ионной компоненты плазмы.

При проведении экспериментов резонатор не перестраивался. Измерение распределения напряженности электрического СВЧ-поля в резонаторе проводилось штыревой антенной. Было установлено, что оно ориентировано вдоль его оси и может быть описано функцией Бесселя нулевого порядка. Пространственное распределение напряженности электрического СВЧ-поля, обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие ($E_{ЭЦР}$), рассчитывалось с использованием данных, полученных экспериментальным путем с учетом угла между векторами электрического и магнитного СВЧ-полей. Было установлено, что его максимальное значение находится на расстоянии $r = 2,1$ см от оси резонатора и на расстоянии $z = 0,5$ см от его сплошной торцевой стенки, к оси резонатора и к его периферии напряженность электрического поля уменьшается.

Радиальное распределение ионного тока определялось одиночным электрическим зондом (диаметр 0,05 см, длина 0,2 см), ориентированным вдоль оси системы в условиях равенства потенциалов на нем (U_p) и C1 (U_{C1}) вблизи первой сетки системы экстракции. В условиях всех проводимых экспериментов $U_{C1} = -50$ В. Массовый расход газа m [мг/с] рассчитывался по давлению аргона в вакуумной камере, имеющей объем $2,9 \cdot 10^4$ см³, с учетом производительности используемого турбомолекулярного насоса ТМН 500, а именно, $Q = 4 \cdot 10^5$ см³/с.

Энергетическая эффективность определялась как отношение тока в цепи первой сетки системы экстракции

(I_1) к СВЧ-мощности генератора ($P_{ген}$) $\eta_p = I_1/P_{ген}$, а также, с учетом отраженной мощности, через СВЧ-мощность, поступающую в резонатор ($P_{пр}$), $\eta_{пр} = I_1/P_{пр}$. Для определения энергетической цены иона μ_p и $\mu_{пр}$ использовались соответствующие им η_p и $\eta_{пр}$. Газовая эффективность рассчитывалась по формуле $\eta_m = I_1 M_{Ar} / e \cdot m$, где M_{Ar} , e – масса и заряд иона аргона.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально было установлено, что при массовом расходе газа $m = (0,1-0,4)$ мг/с при СВЧ-мощности генератора $P_{ген} = (20-70)$ Вт в разрядной камере формируется кольцеобразное плазменное образование, а радиальное распределение ионного тока в цепи зонда имеет максимальное значение в области максимума $E_{ЭЦР}$. Также было установлено, что величина тока в цепи первой сетки системы экстракции не зависит от величины положительного потенциала на второй сетке, что указывает на корректность проводимых измерений, а также на то, что первая сетка сепарирует доминирующее число ионов, поступающих на нее. В проводимых экспериментах вторая сетка была соединена с корпусом инжектора.

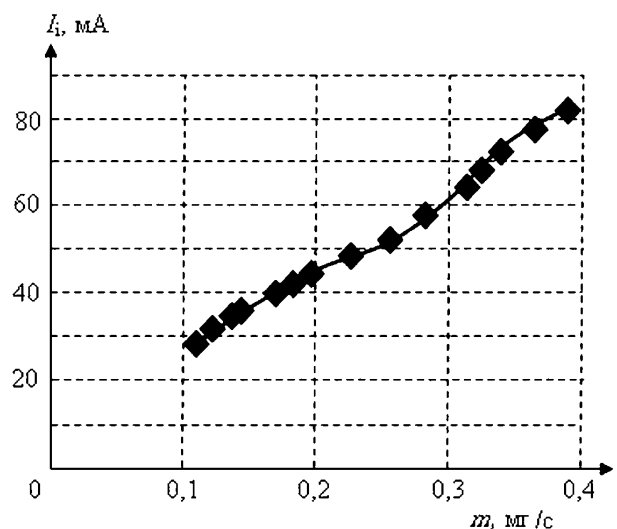


Рис. 2. Зависимость ионного тока в цепи первой сетки системы экстракции (I_1) от массового расхода газа (m). $P_{ген} = 20$ Вт.

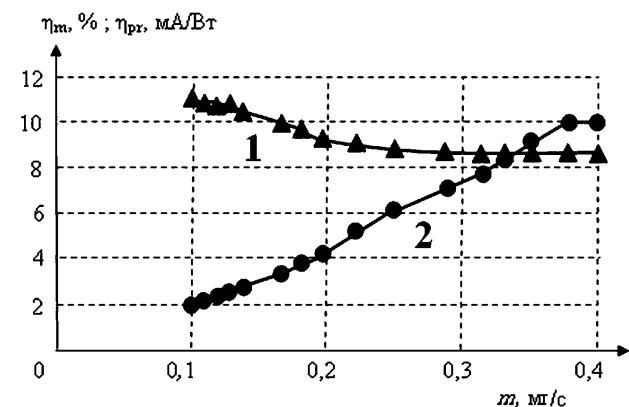


Рис. 3. Зависимости газовой (кривая 1) и энергетической (кривая 2) эффективности источника плазмы от массового расхода газа. $P_{ген} = 20$ Вт.

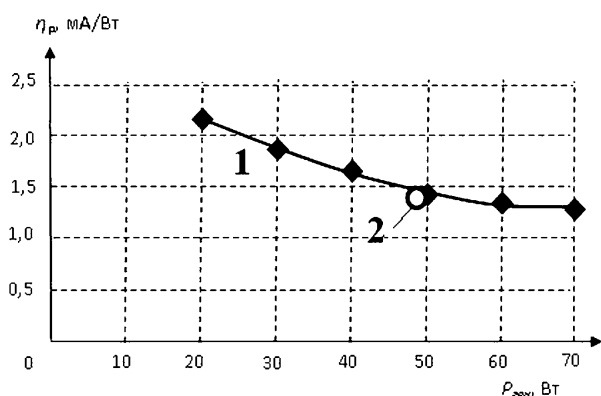


Рис. 4. Зависимость энергетической эффективности (η_p) от величины СВЧ-мощности генератора ($P_{ген}$) при массовом расходе газа $m = 0,2$ мг/с (кривая 1), точка 2 – данные работы [3].

На рис. 2 представлена зависимость ионного тока в цепи первой сетки системы экстракции от массового расхода газа, а на рис. 3 – соответствующие зависимости газовой (η_m) и энергетической (η_p) эффективности источника плазмы, полученные при мощности СВЧ-генератора $P_{ген} = 20$ Вт. Условия проводимых исследований позволяют сравнить полученные результаты с результатами работы [3], в котором использовался СВЧ-генератор ($f = 2,45$ ГГц) мощностью до 50 Вт, рабочий газ – Ar, а экстракция плазменного потока осуществлялась магнитным полем (магнитное сопло). С этой целью на рис. 4 представлена зависимость энергетической эффективности (η_p) от величины СВЧ мощности генератора ($P_{ген}$) при массовом расходе газа $m = 0,2$ мг/с, а в таблице характеристики сравниваемых источников.

Таблица

	m мг/с	I_i мА	$P_{ген}$ Вт	η_p мА/Вт	$\eta_{пр}$ мА/Вт	μ_p эВ/ион	$\mu_{пр}$ эВ/ион	η_m %
Данные работы [3]	0,1	29,4	45	0,65		1530		12,2
	0,2	66,7	47	1,42		700		13,9
CERA-RI-2	0,1	28,8	20	1,44	2,0	690	500	11
	0,2	44	20	2,20	4,3	460	230	9,4
	0,3	63	20	3,15	7,7	320	130	8,5
	0,4	82	20	4,10	10,0	240	100	8,5

Из представленного материала видно, что при аналогичных условиях энергетическая эффективность источника плазмы CERA-RI-2 выше, а газовая эффективность ниже чем в ЭЦР-двигателе, характеристики которого представлены в работе [3]. При этом как в первом, так и во втором случаях величина η_p может быть увеличена до значений близких к $\eta_{пр}$ согласованием высокочастотного тракта с источником плазмы для конкретного режима его работы, а газовая эффективность источника CERA-RI-2 применением коллимирующий плазменный поток диафрагм.

Результаты работы показывают перспективность продолжения работы по оптимизации параметров плазменного инжектора CERA-RI-2, отличающегося от известных конфигурацией электрического СВЧ-поля и постоянного магнитного полей, обеспечивающих формирование ЭЦР-плазмы.

Заключение

Экспериментально установлено, что в исследуемом инжекторе плазмы CERA-RI-2 с увеличением массового расхода рабочего газа увеличивается величина ионного тока и энергетическая эффективность, при этом снижается

энергетическая цена иона и газовая эффективность. Сравнение полученных результатов с результатами работы [3] показывает, что разрабатываемый инжектор плазмы CERA-RI-2 по параметрам формируемой плазмы является конкурентоспособным инжекторам аналогичного типа.

Результаты работы могут представлять практический интерес благодаря возможности использования разрабатываемого инжектора в различных областях науки и техники.

Продолжение начатой работы предполагается в направлении повышения газовой и энергетической эффективности источника плазмы в условиях формирования плазменного потока.

Литература

- 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), Washington, D.C. USA
- Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa, et al. / VI Int.Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications". Russia, Zvenigorod, 2006. Abstracts, p. 32.
- Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Felix Cannat, Denis Packan. IEPC-2013-420.
- Балмашинов А.А. Тезисы докладов XL Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2013, с.151.

Parameters of ECR plasma created in a narrow coaxial cavity of the CERA-RI-2 injector

A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov

People's Friendship University of Russia
6 Mikluho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia,
E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Received April 12, 2014

The CERA-RI-2 plasma injector is described as a compact ECR device. Experimentally obtained parameters of plasma formed in the injector have been presented. Gas and energetic efficiencies of ion flow formation are determined for different values of working gas mass utilization.

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

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, coaxial resonator, mass utilization, energy efficiency.

References

1. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013) (Washington, D.C. USA)
2. Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa, et al., in *Abstracts of the VI Int. Confer. "Microwave discharge: fundamentals and applications"* (Russia, Zvenigorod, 2006), p. 32.
3. Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Felix Cannat, Denis Packan, in *IEPC-2013-420*.
4. A. A. Balmashnov, in *Abstracts of the XL Intern. Confer. on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Synthesis* (Zvenigorod, Russia, 2013), p. 151.