

УДК 533.9.07

Характеристики плазмы ЭЦР-разряда в узком коаксиальном резонаторе плазменного инжектора CERA-RI-2

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

Дано описание компактного ЭЦР-инжектора плазмы CERA-RI-2, разработанного на основе узкого коаксиального резонатора. Представлены результаты экспериментального исследования характеристик формируемой в нем плазмы. Определены газовые и энергетические эффективности формирования ионного потока для различных значений 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

Широкая область практического использования электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) стимулирует работы по созданию ЭЦР-источников плазмы. 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.

В настоящее время в ряде лабораторий мира ведутся интенсивные исследования по созданию плазменных ЭЦР-двигателей (плазменных инжекторов) для различного класса космических аппаратов [1]. При разработке двигателей коррекции орбит легких космических аппаратов особое внимание уделяется системам, в которых ЭЦР-разряд реализуется в коаксиальных резонаторах, причем экстракция ионной компоненты из них может осуществляться различными способами, в частности, системой электродов [2] или с применением магнитного сопла [3]. Преимущество использования коаксиальных резонаторов над полыми заключается в возможности создания компактных устройств, что позволяет не только уменьшить их массу, но и увеличить энергетическую и газовую эффективность.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.

Степина Светлана Петровна, доцент.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент.

Российский университет дружбы народов.

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

Тел.: 8.495 955-09-23.

E-mail: abalmashnov@ Rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.

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

Первые результаты нашей работы по созданию компактного ЭЦР-инжектора плазмы CERA-RI на основе коаксиального резонатора [4] показали перспективность продолжения начатых исследований. Источник плазмы инжектора CERA-RI состоял 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 используется источник плазмы CERA-RI-2 с измененными (по сравнению с CERA-RI) характеристиками разрядной камеры, а именно, уменьшена высота резонатора и диаметр его осевого электрода, а также смещена область ЭЦР-взаимодействия в сторону системы экстракции ионного потока. Это сделано в расчете на возможное повышение газовой и энергетической эффективностей плазменного инжектора, которые, в общем случае, зависят как от метода экстракции ионной компоненты плазмы, так и от характеристик используемого ЭЦР-источника плазмы.

Цель данной работы заключалась в исследовании параметров плазмы, формируемой в узком коаксиальном резонаторе инжектора CERA-RI-2.

Постановка задачи и метод ее решения

Задачей исследований являлось определение зависимостей газовой и энергетической эффективностей инжектора плазмы CERA-RI-2 от массового расхода рабочего газа в условиях имитации экстракции ионной компоненты.

Схема инжектора CERA-RI-2 представлена на рис. 1. Он состоит из узкого цилиндрического коаксиального резонатора 1, одна из стенок которого представляет собой систему их двух

сетчатых электродов С1 и С2 с коэффициентом прозрачности 0,7, расположенных на расстоянии 0,5 см друг от друга и способных перемещаться вдоль его оси. Потенциалы на электродах относительно корпуса источника могут варьироваться. Диафрагма 2 представляет собой металлический плоский диск с кольцеобразной прорезью. Исследования проводились без использования диафрагмы и с ней. В последнем случае она располагалась

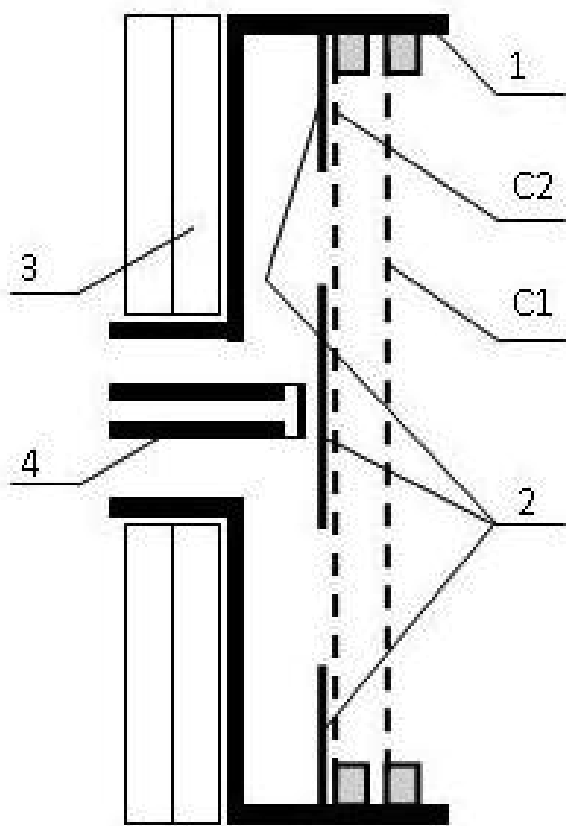


Рис. 1. Схема инжектора CERA-RI-2: 1 — корпус коаксиального резонатора, С1 и С2 — сетчатые электроды, 2 — диафрагма, 3 — дискообразные магниты, 4 — осевой электрод резонатора.

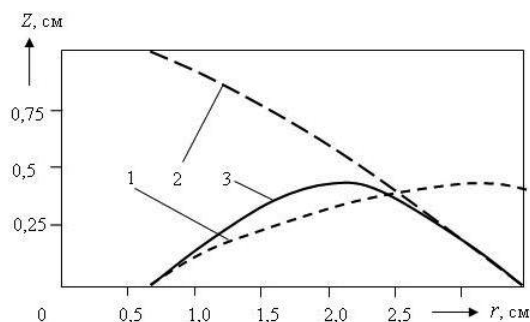


Рис. 2. Пространственные распределения полей в резонаторе инжектора CERA-RI-2: 1 — напряженность магнитного поля $B_{\text{ЭЦР}}$ обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие; 2 — напряженность электрического СВЧ-поля в резонаторе E_r , 3 — напряженность электрического СВЧ-поля $E_{\text{ЭЦР}}$ обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие.

перед С1 на расстоянии 0,1 см и обеспечивала экранировку областей резонатора, незаполненных плазмой ЭЦР-разряда от камеры откачки.

Азимутально симметричное стационарное магнитное поле создается кольцевыми магнитами 3. Профиль и напряженность магнитного поля в источнике измерялись датчиком Холла SS94A1F.

В работе использовался магнетронный генератор (М-107, $f = 2,45$ ГГц). СВЧ-мощность поступала на осевой электрод резонатора 4, который одновременно служил для ввода рабочего газа Ar 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. При проведении экспериментов резонатор не перестраивался. Измерение распределения напряженности электрического СВЧ-поля в резонаторе проводилось штыревой антенной.

На рис. 2 представлены пространственные распределения величины магнитного поля $B_{\text{ЭЦР}}$ обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие, и амплитуды электрического СВЧ-поля в резонаторе E_r . На рис. 2 также представлено пространственное распределение напряженности электрического поля $E_{\text{ЭЦР}}$ обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие и рассчитанное с использованием данных, полученных экспериментальным путем с учетом угла между векторами СВЧ-электрического и магнитного полей. Было установлено, что его максимальное значение находится на расстоянии $r = 2$ см от оси резонатора и на расстоянии $z = 0,5$ см от его сплошной торцевой стенки. По направлению 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 на С1 U_{C1} вблизи первой сетки системы экстракции. В условиях всех проводимых экспериментов $U_{C1} = -50$ В. Массовый расход газа m [мг/с] рассчитывался по его давлению в вакуумной камере, имеющей объем $2,9 \cdot 10^4$ см³, с учетом производительности используемого турбомолекулярного насоса ТМН 500 на уровне $Q = 4 \cdot 10^5$ см³/с.

Энергетическая эффективность определялась как отношение тока в цепи первой сетки системы экстракции I_i к полной СВЧ-мощности генератора $P_{\text{ген}}$, т.е. $\eta_p = I_i / P_{\text{ген}}$. Если учесть коэффициент

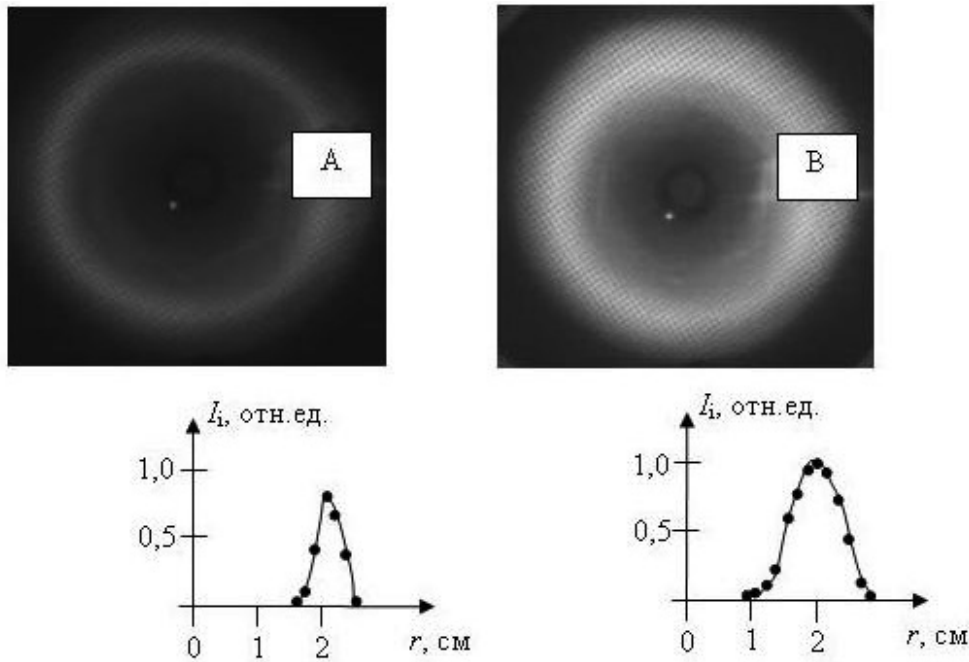


Рис. 3. Фотографии и соответствующие им радиальные распределения ионного тока насыщения I_i в цепи одиночного зонда (диафрагма отсутствует). $P_{ген} = 20$ Вт. А — $m = 0,1$ мг/с, В — $m = 0,3$ мг/с.

ее отражения от резонатора, то можно определить истинную энергетическую эффективность через СВЧ-мощность, поступающую в резонатор $P_{пр}$, т.е. $\eta_{пр} = I_i / P_{пр}$. При определении энергетической цены иона μ_p (или μ_{pr}) использовались соответствующие им η_p (или η_{pr}). Газовая эффективность рассчитывалась по формуле $\eta_m = I_i \cdot M_{Ar} / e \cdot m$, 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 и при СВЧ-мощности генератора $P_{ген} = 20$ Вт в разрядной камере формируется кольцеобразное плазменное образование, а радиальное распределение ионного тока в цепи зонда имеет максимальное значение в области максимума $E_{эЦР}$ (см. рис. 3).

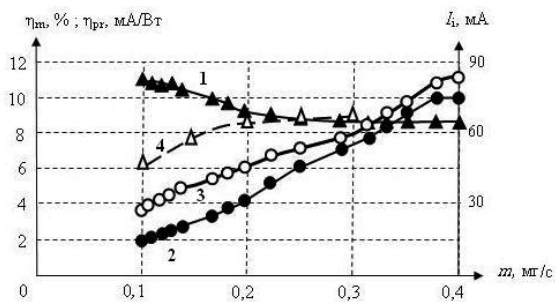


Рис. 4. Зависимости от массового расхода газа m следующих величин: кривая 1 — газовая эффективность η_m ; 2 — энергетическая эффективность $\eta_{пр}$ источника плазмы; 3 — ионный ток в цепи первой сетки системы экстракции I_i — все при отсутствии диафрагмы; 4 — ионный ток в цепи первой сетки системы экстракции I_i при наличии диафрагмы.

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, т.е. на то, что первая сетка практически полностью сепарирует ионы, поступающие на нее. В проводимых экспериментах вторая сетка была соединена с корпусом инжектора.

При мощности СВЧ-генератора $P_{ген} = 20$ Вт и в отсутствие диафрагмы были получены зависимости ионного тока в цепи первой сетки системы экстракции I_i , а также газовой η_m и энергетической $\eta_{пр}$ эффективности источника плазмы от массового расхода газа m (см. рис. 4).

Условия проводимых исследований позволяют сравнить представленные результаты с результатами работы [3], в которой 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 составлена таблица, содержащая характеристики сравниваемых инжекторов.

Видно, что при аналогичных условиях энергетическая эффективность источника плазмы СЕРА-RI-2 выше, чем в плазменном ЭЦР-двигателе, характеристики которого представлены в работе [3]. При этом как в первом, так и во втором инжекторах величина η_p может быть увеличена до значений близких к $\eta_{пр}$ согласованием высокочастотного тракта с источником плазмы для конкретного режима их работы.

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	
	с диафрагмой								
	0,2	67	20	3,35	8,3	300	120	13,6	

С целью увеличения газовой эффективности CERA-RI-2 η_m и последующего сравнения ее величины с результатом работы [3] была применена диафрагма с кольцеобразной прорезью, обеспечивающая выход ионов на первую сетку системы экстракции и экранирующая область разрядной камеры (резонатора), не содержащую плазму от системы откачки. Выбор размеров диафрагмы основывался на предположении, что при расходе рабочего газа 0,2 мг/с концентрация нейтралов в разрядной камере увеличится и режим работы источника будет примерно соответствовать ранее реализуемому при $m = 0,3$ мг/с (рис. 3 и 4). В результате выбраны следующие размеры: диаметр центрального диска диафрагмы — 3 см, внутренний и внешний диаметры его кольцевой части — 5,6 см и 7,8 см, соответственно.

На рис. 4 представлена зависимость ионного тока в цепи первой сетки системы экстракции от массового расхода газа, полученная в условиях использования диафрагмы. Зависимость показывает, что геометрические размеры диафрагмы достаточно хорошо соответствуют полученному результату. Увеличение ионного тока при расходе газа до $m = 0,2$ мг/с определяется увеличением концентрации нейтралов в разрядной камере. Незначительный его рост при дальнейшем увеличении m связан с увеличением диаметра плазменного образования. При этом представленные в таблице результаты измерений показывают, что при использовании диафрагмы все характеристики источника плазмы существенно улучшаются.

Необходимо отметить, что исследования проводились в режиме имитации экстракции ионной компоненты и их сравнение с результатами работы [3], где представлены параметры ионного потока, регистрируемые на выходе из инжектора, являются не совсем корректными, т.к. использование электродной системы экстракции ионного потока сопряжено с уменьшением ионного тока

и энергетической эффективности CERA-RI-2 инжектора в целом.

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. Показано, что энергетическая и газовая эффективности могут быть увеличены применением диафрагмы, экранирующей область резонатора, не заполненную плазмой ЭЦР-разряда, от камеры откачки. Сравнение полученных результатов с результатами работы [3] показывает, что разрабатываемый инжектор плазмы CERA-RI-2 может обеспечить более высокие характеристики.

Результаты работы представляют практический интерес ввиду возможности использования разрабатываемого инжектора в различных областях науки и техники.

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

Литература

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