

УДК 533.9.07

Энергетическая и газовая эффективности формирования ЭЦР-плазмы в коаксиальном резонаторе со спиральной волноводной структурой

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

Представлены результаты экспериментального исследования параметров ЭЦР-плазмы, формируемой в коаксиальном резонаторе со спиральной волноводной структурой. Определены зависимости газовой и энергетической эффективности формирования ионного потока от массового расхода рабочего газа (Ar) и СВЧ-мощности (2,45 ГГц), вводимой в резонатор.

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

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

Введение

В настоящее время источники плазмы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) широко используются в различных областях науки и техники.

Реализуемые в них технические решения определяются конкретными процессами, для которых они разрабатываются, и связаны с применением 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 посвящены исследования в ряде лабораторий мира, является создание плазменных ЭЦР-двигателей для различного класса космических аппаратов (плазменных инжекторов) [1]. При этом для двигателей 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 массу инжектора.

Энергетическая и газовая эффективности плазменных инжекторов в значительной мере определяются электродинамическими характеристиками используемого ЭЦР-источника плазмы.

Ранее, в работе [4], нами были представлены результаты тестовых испытаний инжектора CERA-RHI, состоящего из коаксиального резонатора, центральный электрод которого был выполнен в виде спирали (СВС). Постоянное магнитное поле, создаваемое кольцеобразными постоянными магнитами, обеспечивало как формирование плазмы в условиях ЭЦР (для частоты $f = 2,45$ ГГц), так и ее экстракцию. Было установлено, что при массовом расходе газа рабочего газа Ar на уровне $\dot{m} = 0,3$ мг/с и при величине СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, примерно 50 Вт формируется поток плазмы, ток ионной компоненты в котором составляет 60 мА. Этим параметрам соответствуют: газовая эффективность $\eta_m = 8,4$ %, энергетическая эффективность $\eta_p = 1,2$ мА/Вт, энергетическая цена иона $\mu_p = 830$ эВ/ион.

С целью повышения значений η_m и η_p источник плазмы инжектора CERA-RHI был в дальнейшем модернизирован, а именно, соосно центральному электроду СВС введены трубка из кварцевого стекла (разрядная камера), а в области возбуждения СВЧ-поля — тонкий графитовый стержень. Это позволило локализовать область формирования плазмы и создать условие для ее поджига при относительно низких значениях массового расхода газа.

Цель данной работы — определить зависимость энергетической и газовой эффективности модернизированного ЭЦР-источника плазмы инжектора CERA-RHI-2 от массового расхода рабочего газа.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.

Бутко Наталия Борисовна, доцент.

Калашников Андрей Владимирович, научный сотрудник.

Калашников Владимир Владимирович, аспирант.

Степина Светлана Петровна, доцент.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент.

Российский университет дружбы народов (РУДН).

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

Тел.: 8 (495) 955-09-23; 8 (495) 955-08-29.

E-mail: anumnov@yandex.ru; abalmashnov@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2015 г.

© Балмашинов А. А., Бутков Н. Б., Калашников А. В., Калашников В. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2015

Постановка задачи и метод ее решения

Газовая и энергетическая эффективность инжекторов плазмы в значительной мере 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 плазменном ЭЦР-инжекторе CERA-RHI-2.

Схема источника плазмы инжектора CERA-RHI-2 представлена на рис. 1. Он состоит из цилиндрического коаксиального резонатора, центральный электрод 1 которого выполнен в виде спиральной волноводной структуры (СВС, диаметр 1,3 см), и системы постоянных дискообразных магнитов 2. Соосно СВС располагается цилиндрическая разрядная камера 3 (кварцевое стекло, диаметр 0,9 см) внутри которой находится электрод 4. Цилиндрический корпус 5 коаксиального резонатора снабжен подвижным поршнем 6, позволяющим осуществлять его настройку на частоту СВЧ-генератора. В работе использовался магнетронный генератор М-107 ($f = 2,45$ ГГц), в качестве рабочего газа — аргон. Поступающая и отраженная СВЧ-мощности, а также давление в камере откачки регистрировались традиционными методами. Значение коэффициента стоячей волны (КСВ) системы СВЧ-генератор—резонатор как в присутствии, так и при отсутствии плазмы практически не менялся и не превышал 1,1. Поступающая и отраженная СВЧ-мощности измерялись с помощью направленного ответвителя прибором Я2М-66. Массовый расход газа \dot{m} рассчитывался по давлению аргона в вакуумной камере с объемом $2,9 \cdot 10^4$ см³ при учете производительности $Q = 4 \cdot 10^5$ см³/с используемого турбомолекулярного насос (ТМН 500),

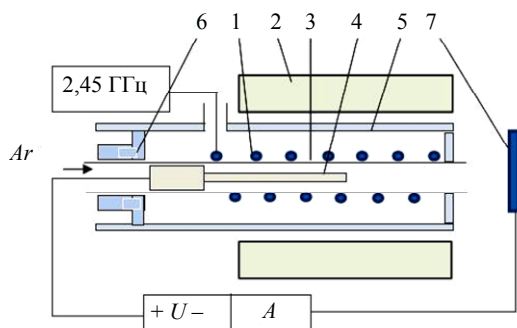


Рис. 1. Схема источника плазмы: 1 — спиральная волноводная структура (СВС), 2 — дискообразные магниты, 3 — разрядная камера, 4 — графитовый электрод, 5 — корпус резонатора, 6 — подвижный поршень

Энергетическая эффективность η_p определялась как отношение тока I в цепи коллектор—центральный электрод (соответственно позиции 7 и 4 на рис. 1) к величине СВЧ-мощности $P_{ген}$, поступающей в резонатор, т.е. $\eta_p = I / P_{ген}$. Энергетическая цена иона μ_p рассчитывалась по величине η_p . Газовая эффективность — по формуле $\eta_m = I M_{Ar} / (e \dot{m})$, где M_{Ar} , e — масса и заряд иона аргона.

Полученные результаты и их обсуждение

Было установлено, что при массовом расходе газа $\dot{m} = (0,01-0,04)$ мг/с и при СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, на уровне $P_{ген} = 10$ Вт и более в разрядной камере происходит устойчивый поджиг плазмы. Экспериментально получены зависимости ионного тока в цепи электродов 4–7 (рис. 1) от приложенной разности потенциалов U для различных значений массового расхода газа, но для постоянного значения СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, на уровне 12 Вт. На основе этих данных были рассчитаны энергетическая цена иона μ_p и газовая эффективность η_p источника плазмы. Зависимости этих величин от массового расхода газа для различных значений U представлены на рис. 2 и 3. Результаты показывают, что в исследуемом источнике плазмы снижение энергетической цены иона (т. е. рост энергетической эффективности) сопровождается снижением газовой эффективности, что необходимо учитывать при оптимизации режима работы источника плазмы.

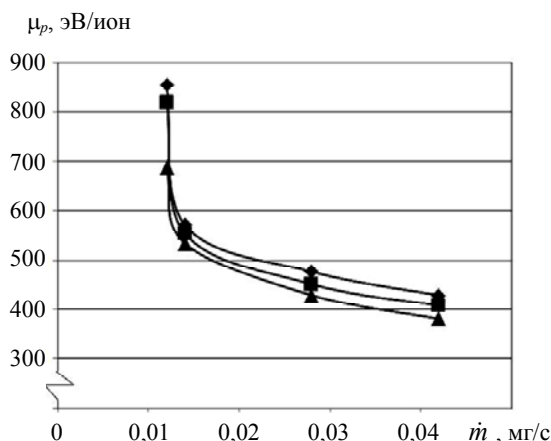


Рис. 2. Зависимость энергетической цены иона μ_p от массового расхода газа \dot{m} для различных значений разности потенциалов U между электродами 4 и 7. $P_{ген} = 12$ Вт. \blacklozenge — $U = 100$ В, \blacksquare — $U = 150$ В, \blacktriangle — $U = 300$ В

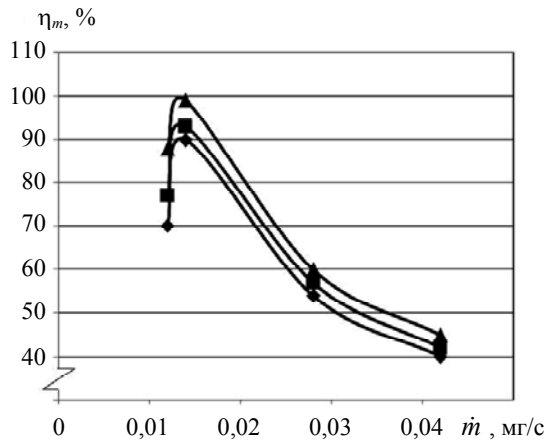


Рис. 3. Зависимость газовой эффективности η_m от массового расхода газа \dot{m} для различных значений разности потенциалов U между электродами 4 и 7. $P_{ген} = 12$ Вт.
 ◆ — $U = 100$ В, ■ — $U = 150$ В, ▲ — $U = 300$ В

Сравнение представленных в таблице результатов работы [2], в которой опубликованы

висящий от наличия или отсутствия плазмы, а также устойчивый поджиг разряда при относительно низких расходах рабочего газа.

Заключение

Экспериментально установлено, что в исследуемом источнике плазмы с увеличением массового расхода рабочего газа увеличивается величина ионного тока и энергетическая эффективность, однако при этом снижается энергетическая цена иона и газовая эффективность. Сравнение полученных результатов с результатами работы [2] показывает, что разрабатываемый источник плазмы инжектора плазменного потока CERA-RHI-2 по параметрам формируемой плазмы является конкурентоспособным инжекторам аналогичного типа. Результаты работы могут представлять практический интерес в виду возможности использования разрабатываемого инжектора в различных областях науки и техники.

Таблица

	\dot{m} , мг/с	I , мА	$P_{ген}$, Вт	η_p , мА/Вт	μ_p , эВ/ион	η_m , %
Данные работы [2] Рабочий газ ксенон	0,01	5	7,5	0,67	1490	65,6
	0,02	12,1	8	1,51	662	79,4
	0,029	10	10	1	1000	45,3
	0,029	15	25	0,6	1670	67,9
CERA-RHI-2 Рабочий газ аргон. $U = 300$ В	0,012	17,5	12	1,46	687	61,6
	0,014	23,1	12	1,87	534	69,3
	0,028	28,0	12	2,33	429	42,0

характеристики малогабаритного ЭЦР-инжектора плазмы (на той же частоте 2,45 ГГц), с результатами проведенных нами исследований показывает, что исследуемый источник плазмы позволяет достигнуть более высокую энергетическую эффективность при той же газовой эффективности. При этом следует отметить, что содержащиеся в работе [2] результаты получены в условиях экстракции плазменного потока из источника плазмы системой состоящей из двух сетчатых электродов, в то время как наши — при ее отсутствии. В связи с этим становится существенным вопрос о степени эффективности системы экстракции, которая будет реализована в наших дальнейших исследованиях.

Указанные результаты работы показывают перспективность продолжения работы по оптимизации параметров разрабатываемого ЭЦР-источника плазмы, отличающегося от известных образцов схемой организации электрического СВЧ-поля, обеспечивающей низкий КСВ, практически не за-

Продолжение начатой работы предполагается в направлении разработки эффективной системы экстракции плазмы из разрабатываемого источника, 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, et al. IEPC-2013-420.
- Балмаинов А. А., Калаишиков А. В. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 93.

Power and gas formation efficiency ECR plasma in the coaxial resonator with a helical waveguide structure

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

People' Friendship University of Russia, Plasma Physics Lab.
6 Miklukho-Maklaya str, Moscow, 117198, Russia
E-mail: abalmashnov@rambler.ru; anumnov@yandex.ru

Received March 3, 2015

Experimental results on the parameters of the ECR plasma formed in a coaxial resonator with a helical waveguide structure are presented. The dependences of the gas and energy efficiency of formation of ion flow on the mass flow rate of the working gas (Ar) and microwave power (2.45 GHz) introduced into the cavity are obtained.

PACS: 52.50.Sw, 52.27.Ny, 52.40.Db

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

REFERENCES

1. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013) (Washington, D.C. USA, 2013).
2. Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa et al. in *Proc. VI Int. Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications"*. (Russia, Zvenigorod, 2006). P. 32.
3. Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Felix Cannat, et al. *IEPC-2013-420* (Washington, D.C. USA, 2013).
4. A. A. Balmashnov and A. V. Kalashnikov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 93 (2008).