

Генерация плазменного потока на основе ЭЦР-разряда в узком коаксиальном резонаторе

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

Установлена возможность одновременной экстракции ионной и электронной компонент плазмы и формирование скомпенсированного по току потока плазмы, создаваемой в узком коаксиальном резонаторе на ЭЦР. Представлены характерные зависимости ионного тока от массового расхода газа (аргон) и вводимой в резонатор СВЧ-мощности.

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный резонатор, система экстракции частиц.

Ссылка: Балмашинов А. А., Бутко Н. Б., Калашников А. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 5.

Reference: A. A. Balmashnov, N. B. Butko, A. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, Prikl. Fiz., No. 3, 5 (2019).

Введение

Традиционно для компенсации заряда ионного потока формируемого в инжекторах различного типа и, в частности, в двигателях коррекции орбит легких космических аппаратов, например СПД [1, 2], используют сторонние источники электронов, что влияет на временной ресурс их работы [3, 4]. Очевидно, повышение надежности такого типа 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 амбиполярного потенциала, обеспечивающего экстракцию электронов и компенсацию пространственного заряда плазменного потока [5].

Наряду с несомненным интересом к разработке плазменных инжекторов с безэлектродной системой экстракции частиц плазмы, предполагающего их использование в качестве маршевых двигателей космических аппаратов, сохраняется определенное внимание и к системам, в которых экстракция частиц осуществляется сетчатыми электродами. Присущие им незначительные массогабаритные параметры могут обеспечить их эффективное использование для коррекции орбит сверхлегких спутников Земли. При этом существенным является энергетическая эффективность таких инжекторов, величина которой зависит от способа ввода энергии в плазму. Это указывает на перспективность использования резонансных процессов в создании плазмы и, в частности, электронного циклотронного резонанса (ЭЦР).

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

Бутко Наталия Борисовна, доцент.

Калашников Андрей Владимирович, н.с.

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.

Тел. 8(495) 955-09-23.

E-mail: abalmashnov@rambler.ru, nbutko@rambler.ru,

guiltyvine@gmail.com, stepinasvetlana@rambler.ru,

anumnov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2019 г.

© Балмашинов А. А., Бутко Н. Б., Калашников А. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2019

Экспериментальные исследования формирования плазмы в узком коаксиальном резонаторе ЭЦР-разрядом в аксиально-симметричном магнитном поле [6] показали наличие условий (давление рабочего газа, вводимая СВЧ-мощность), при которых концентрация заряженных частиц может превышать критическое значение для используемой частоты СВЧ-поля $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад с^{-1} , а расчетная величина ионного тока при СВЧ-мощности 20 Вт, вводимой в резонатор, и массовым расходе газа (Ar) = 0,2 мг/с 44 мА [7].

Целью данной работы являлась изучение параметров плазменного потока, формируемого в условиях одновременной экстракции ионной и электронной компонент плазмы, создаваемой в узком коаксиальном резонаторе на ЭЦР.

Постановка задачи и метод ее решения

Задача исследований заключалась в изучении параметров потока плазмы, формируемой в узком коаксиальном резонаторе на ЭЦР при компенсации тока ионной компоненты экстрагируемым из плазмы потоком электронов.

Схема инжектора плазмы представлена на рис. 1. Инжектор состоит из узкого цилиндрического коаксиального резонатора, одна из стенок которого представляет собой систему аксиально расположенных сетчатых электродов, обеспечивающих возможность экстракции ионной и электронной компонент плазмы.

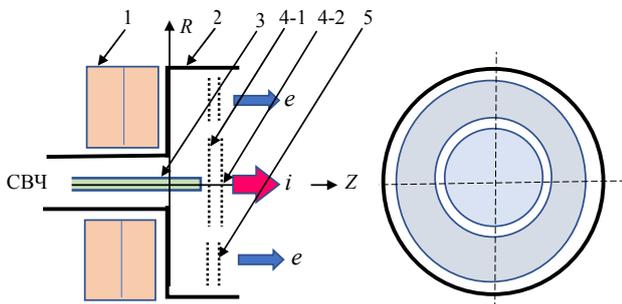


Рис. 1. Схема инжектора плазмы: 1 – кольцеобразные магниты; 2 – корпус цилиндрического резонатора; 3 – центральный электрод коаксиального резонатора; 4 – сетчатые электроды экстракции ионов; 5 – сетчатые электроды экстракции электронов.

Размер резонатора (диаметр) и профиль магнитного поля отличаются от ранее использованных в работе [6]. Диаметр резонатора

составлял 5,2 см (ранее 7 см), расстояние до первых сеток системы экстракции 1,0 см. 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^{-1}). СВЧ-мощность подавалась на осевой электрод резонатора диаметром 0,4 см. Вводимая и отраженная СВЧ-мощности измерялись с помощью направленного ответвителя прибором Я2М-66. Коэффициент стоячей волны (КСВ) ненагруженного резонатора составлял 1,15, а во всех изучаемых режимах работы инжектора не превышал 1,05.

Азимутально-симметричное стационарное магнитное поле создавалось неодимовыми кольцевыми магнитами (внешний диаметр 5 см). Распределение магнитного и СВЧ-электрического полей определяли расположение азимутально-симметричной области ЭЦР-взаимодействия, которая находилась на расстоянии $R_c = (1,6 \pm 0,2)$ см от оси резонатора и $Z_c = (5,0 \pm 0,2)$ см от его сплошной торцевой стенки. Система экстракции ионной компоненты плазмы представляла собой два последовательно расположенных на расстоянии 0,2 см сетчатых электрода диаметром 2,4 см, соосно которым были расположены кольцеобразные электроды экстракции электронной компоненты – внутренний диаметр 3,0 см, внешний диаметр 4,7 см (рис. 1). Потенциалы на электродах системы экстракции могли варьироваться.

Диагностика параметров плазменного потока осуществлялась дискообразным электродом (диаметр 6 см), электрическим зондом с охранным кольцом, способным перемещаться как в продольном, так и в поперечном направлениях (диаметр активной части зонда 0,2 см), и пятисеточным анализатором энергии заряженных частиц.

Влиянием постоянного магнитного и СВЧ-электрического полей при обработке результатов измерений пренебрегалось. В работе использовался турбомолекулярный насос ТМН 500. Массовый расход рабочего газа рассчитывался по величине давления в вакуумной системе и производительности используемого насоса. Давление измерялось тради-

ционным образом. В качестве рабочего газа использовался аргон.

Полученные результаты и их обсуждение

Установлено, что в условиях проводимых экспериментов (давление в камере откачки $(1,6-3,2) \times 10^{-4}$ Торр, массовый расход газа $(0,15-0,3)$ мг/с, вводимая в резонатор СВЧ-мощность $P = (15-45)$ Вт) при отрицательных относительно корпуса источника потенциалах на первой сетке экстракции ионов $(60-100)$ В и отрицательных потенциалах на второй сетке $(200-400)$ В подбором положительных потенциалов на электродах экстракции электронной компоненты плазмы (рис. 1) может быть реализовано условие, при котором плавающий потенциал на плоском электроде, расположенным на расстоянии $Z = 5$ см от системы экстракции частиц, находится в диапазоне ± 10 В. При этом, очевидно, суммарный ток ионов практически равен току электронов, т. е. формируется скомпенсированный по току плазменный поток. Измерения радиального распределения плавающего потенциала одиночным электрическим зондом в области $Z = 5$ см показали его сильную неоднородность, а именно, вблизи оси он существенно положительный, а на периферии – отрицательный.

Ниже представленные результаты получены в условиях равенства потоков ионной и электронной компонент плазмы. На рис. 2 показана зависимость ионного тока насыщения в цепи электрического зонда I от вводимой в резонатор СВЧ-мощности P для различных массовых расходов газа η .

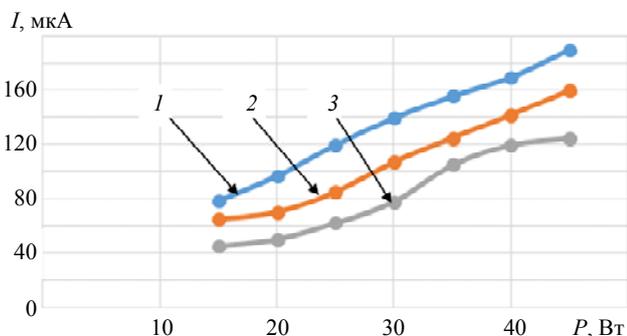


Рис. 2. Зависимость ионного тока насыщения в цепи электрического зонда I от вводимой в резонатор СВЧ-мощности P для различных массовых расходов газа η . Координаты $R = 0$, $Z = 7$ см, потенциал на электроде (4-1) -80 В, на электроде (4-2) -300 В. Кривая 1 – $\eta = 0,30$ мг/с, 2 – $\eta = 0,20$ мг/с, 3 – $\eta = 0,15$ мг/с.

На рис. 3 – радиальное распределение ионного тока насыщения (I) на различных расстояниях от источника плазмы Z . На рис. 4 зависимость тока в цепи коллектора пятисеточного анализатора I_a от задерживающего ионы потенциала U_a в условиях отсечки электронной компоненты плазмы при различных потенциалах U на электроде 4-2.

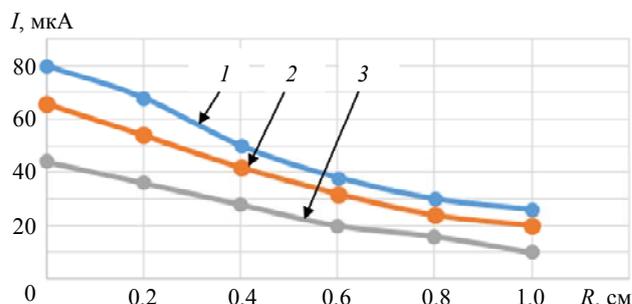


Рис. 3. Радиальное распределение ионного тока насыщения в цепи электрического зонда I на различных расстояниях от источника плазмы Z . Точками указана удаленность центральной части зонда от оси системы (диаметр зонда $0,2$ см). Массовый расход газа $\eta = 0,20$ мг/с, вводимая СВЧ-мощность $P = 20$ Вт, потенциал на электроде (4-1) -80 В, на электроде (4-2) -300 В. Кривая 1 – $Z = 5$ см, 2 – $Z = 7$ см, 3 – $Z = 9$ см.

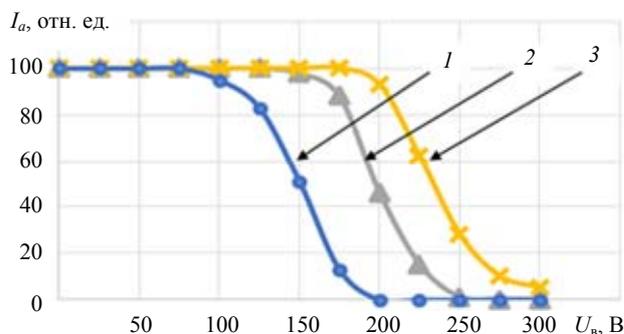


Рис. 4. Зависимость тока в цепи коллектора анализатора I_a от задерживающего ионы потенциала U_a в условиях отсечки электронной компоненты плазмы при различных потенциалах U на электроде 4-2. При обработке результатов была проведена нормировка величины I_a . Координаты $R = 0$, $Z = 7$ см, массовый расход газа $\eta = 0,20$ мг/с, вводимая СВЧ-мощность $P = 20$ Вт, потенциал на электроде (4-1) -80 В. Кривая 1 – $U = -250$ В, 2 – $U = -300$ В, 3 – $U = -350$ В.

Также установлено, что энергетический спектр электронов зависит от потенциалов на электродах экстракции электронной компоненты плазмы: в ионной части вольт-амперных характеристик зонда регистрируются изменения, характерные для наличия потоков ускоренных частиц. При этом температура

электронов (экспоненциальная часть характеристики) практически не меняется и составляет (20 ± 5) эВ.

Представленные результаты показывают возможность управления величиной ионного тока изменением величины массового расхода газа и величины СВЧ-мощности, вводимой в резонатор, а также видоизменять энергетический спектр ионов потенциалом на сетчатом электроде (4-2) системы экстракции ионов. Представляет интерес тот факт, что максимальный ионный ток регистрируется вблизи оси системы, т. е. в области расположения осевого электрода резонатора. Очевидно, это связано с тем, что в этой области напряженность электрического поля экстракции ионов максимальна.

В условиях экспериментов полный ионный ток на расстоянии $Z = 7$ см (при потенциалах на электродах (4-1) -80 В, (4-2) -300 В и при $P = 20$ Вт) составлял $5,6 \pm 0,1$ мА. Отмечаем, что использование (вместо сетчатых электродов) электродов с соосными отверстиями и с высокой прозрачностью может существенно увеличить величину ионного тока. К значительному увеличению тока также должно привести использование дополнительного сетчатого электрода, имеющего непосредственный контакт с осевым электродом резонатора.

Заключение

Экспериментально установлено, что в условиях одновременной экстракции ионной и

электронной компонент ЭЦР-плазмы из различных областей узкого коаксиального резонатора может быть сформирован поток плазмы, параметры которой зависят от массового расхода рабочего газа, вводимой в резонатор СВЧ-мощности и потенциалов на электродах системы экстракции заряженных частиц.

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

Публикация подготовлена
при поддержке Программы РУДН «5-100»
и Министерства образования и науки РФ
(соглашение № 3.2223.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов А. И., Есипчук Ю. В., Капулкин А. М., Невровский В. А., Смирнов В. А. // ЖТФ. 1973. Т. XLIII. Вып. 5. С. 972.
2. Смирнов В. А. / Труды 3-й Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям (Минск, 1976). С. 12–13.
3. Гориков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2009.
4. Ким В. П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
5. Чернов Г. Е., Соловейчик М. М., Романов В. М., Афанасьева Е. М. // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 3 (18). С. 306.
6. Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Умнов А. М. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 6. С. 520.
7. Балмашинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 31.

Generation of plasma flow based on ECR discharge in a narrow coaxial cavity

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

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia

E-mail: abalmashnov@rambler.ru, nbutko@rambler.ru, guiltyvine@gmail.com,
stepinasvetlana@rambler.ru, anumnov@yandex.ru

Received April 12, 2019

The possibility of simultaneous extraction of the ionic and electronic components of the plasma and the formation of a current-compensated plasma stream generated in a narrow coaxial resonator on ECR has been established. The characteristic dependences of the ion current on the mass flow rate of the gas (argon) and the microwave power introduced into the resonator are presented.

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, coaxial resonator, particle extraction system.

REFERENCES

1. A. I. Morozov, Yu. V. Esipchuk, A. M. Kapulkin, V. A. Nevrovsky, and V. A. Smirnov, *Sov. Technical Physics* **XLIII**, 972 (1973).
2. V. A. Smirnov, in *Proc. of the III All-Union Conference on Plasma Accelerators* (Minsk, 1976), pp. 12–13.
3. O. A. Gorshkov, V. A. Muravlev, and A. A. Shagaida, *Hall and ion plasma engines for spacecraft* (Mashinostroenie, Moscow, 2009) [in Russian].
4. V. P. Kim, *Technical Physics* **85** (3), 45 (2015).
5. G. E. Chernov, M. M. Soloveichik, V. M. Romanov, and E. M. Afanasieva, *Alleiya Nauki* **1**, No. 3 (18), 306 (2018).
6. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, and A. M. Umnov, *Plasma Physics Reports* **44** (6), 520 (2018).
7. A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 31 (2014).