

Самовозбуждение низкочастотных колебаний в плазменном кольце, формируемом ЭЦР-разрядом в узком коаксиальном резонаторе

А. А. Балмашнов, А. В. Калашников, В. В. Калашников, С. П. Степина, А. М. Умнов

Представлены результаты экспериментального исследования условий возникновения НЧ-колебаний в плазменном кольце, формируемом ЭЦР-разрядом (Ar) в узком коаксиальном резонаторе. Установлена область параметров разряда, при которых эти колебания являются устойчивыми. Предполагается, что регистрируемые колебания являются следствием возникновения электростатической волны, распространяющейся в азимутальном направлении.

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный резонатор, колебания.

Введение

Изучение колебаний заряженных частиц в аксиально-симметричных плазменных объектах представляет как научный, так и практический интерес. В частности, как показали исследования [1, 2], в каналах стационарных плазменных двигателей (СПД) наблюдаются колебания потенциала плазмы, распространяющиеся как азимутальные волны, наличие которых существенно влияет на эффективность работы двигателей. В работах [2, 3] было установлено, что одновременно с колебаниями потенциала плазмы регистрируются колебания температуры электронов и плотности ионного тока. Колебания на частоте более 50 кГц являются азимутальными, у ионов появляется азимутальная составляющая скорости. В работе [4] отмечается, что азимутальная волна может увеличивать скорость переноса электронов вдоль канала двигателя и тем самым увеличивать расходимость пучка, но в меньшей степени, чем радиальная составляющая скоростей частиц плазмы.

Результаты численных расчетов, представленных в работе [5], позволили сделать вывод, что

увеличение азимутальной составляющей скорости частиц плазмы может привести к потере тяги в СПД до 4 % от общей потери, возникающей за счет расходимости потока плазмы, которая составляет около 10 %.

Разрабатываемый нами инжектор плазмы CERA-RI-2, работающий в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), существенно отличается от традиционных СПД и является одним из вариантов ЭЦР-инжекторов на основе коаксиальных резонаторов [6, 7]. Этим исследованиям в последнее время уделяется определенное внимание ввиду возможности создания микроволновых плазменных систем с малыми массогабаритными параметрами. В инжекторе CERA-RI-2, в отличие от известных систем с коаксиальными резонаторами, ЭЦР-разряд реализуется в азимутально-симметричной области, в результате чего создается плазменное кольцо, оторванное от стенок резонатора [8]. Было установлено, что в CERA-RI-2, как и в СПД, в формируемом потоке плазмы регистрируются низкочастотные (НЧ) колебания ионной компоненты, частота которых лежит в области десятков кГц.

Целью данной работы является исследование условий возникновения этих НЧ-колебаний и их характеристик.

Постановка работы и методы диагностики

Цель исследований, как уже сказано, заключалась в определении условий возникновения низкочастотных колебаний заряженных частиц в плазменном кольце, формируемом ЭЦР-разрядом в CERA-RI-2.

Инжектор CERA-RI-2 ранее подробно описан в работе [8]. Он состоит из узкого цилиндрического коаксиального резонатора, одна из стенок которого представляет собой сетчатый электрод,

Балмашнов Александр Александрович, профессор, д.т.н.
Калашников Андрей Владимирович, научный сотрудник.
Калашников Владимир Владимирович, научный сотрудник.
Степина Светлана Петровна, доцент, к.ф.-м.н.
Умнов Анатолий Михайлович, доцент, к.ф.-м.н.
Российский университет дружбы народов (РУДН).
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
Тел. 8 (495) 955-09-23.
E-mail: abalmashnov@rambler.ru; guiltyvine@gmail.com;
v.v.kalashnikov@qip.ru; stepinasvetlana@rambler.ru;
anumnov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2017 г.

© Балмашнов А. А., Калашников А. В., Калашников В. В.,
Степина С. П., Умнов А. М., 2017

который может перемещаться в продольном направлении, что позволяет осуществлять его частотную настройку. В работе использовался магнетронный генератор со стабилизированным источником питания (М-107, $f = 2,45$ ГГц). СВЧ-мощность подавалась на осевой электрод резонатора, 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.

Стационарное магнитное поле создавалось кольцевыми магнитами. Продольное СВЧ-электрическое поле в резонаторе и профиль магнитного поля формируют азимутально-симметричную кольцеобразную область ЭЦР-взаимодействия. Измерения напряженности СВЧ-электрического поля в резонаторе проводились изолированной диэлектриком штыревой антенной, ориентированной в продольном направлении. В работе использовались два продольно ориентированных одиночных электрических зонда (диаметр 0,05 см, длина 0,2 см), расположенных на расстоянии $R = 1,7$ см от оси симметрии резонатора и под углом $\pi/2$ друг относительно друга. Определение электронной температуры и плавающего потенциала плазмы осуществлялось в автоматическом режиме с использованием компьютерного обеспечения. В качестве опорного электрода использовался корпус резонатора. Влияние СВЧ-поля на регистрируемые вольт-амперные характеристики зонда считалось пренебрежимо малым. При изучении характеристик НЧ-колебаний (амплитуда, частота) сигнал с одного из зондов использовался для запуска развертки осциллографа Hantek DSO5202P. Глубина погружения СВЧ-антенны и электриче-

ских зондов за сетчатый электрод в область резонатора составляла 0,3 см. Давление в вакуумной системе установки измерялось традиционным образом. Откачка системы осуществлялась турбомолекулярным насосом ТМН 500.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально установлено, что при давлении рабочего газа Ar в камере откачки $P_{Ar} = (6,6-7,0) \times 10^{-5}$ Торр и СВЧ-мощности, поступающей от генератора, на уровне 9–16 Вт в области ЭЦР формируется плазменное кольцо. При этом коэффициент стоячей волны (КСВ) системы «генератор – резонатор» становится менее 1,02 (у ненагруженного резонатора КСВ составлял 1,3), а амплитуда СВЧ-поля в резонаторе уменьшается более чем на 90 %. Зондовые измерения показали, что в указанной области условий реализации разряда (давление рабочего газа, СВЧ-мощность) температура электронной компоненты плазмы составляет $T_e = 7 \pm 2$ эВ, а величина плавающего потенциала $V_{fl} = \pm 2$ В. При этом в плазме регистрируются низкочастотные колебания как ионной, так и электронной компонент, частота которых и амплитуда зависят от давления рабочего газа и уровня вводимой в резонатор СВЧ-мощности.

На рис. 1 представлены зависимости частоты колебаний f и их амплитуды A от величины ионного тока насыщения I в цепи одиночного зонда (потенциал на зонде относительно корпуса инжектора $V_{pr} = -30$ В) для различных значений давления в камере откачки. Измерения осуществлялись по следующей схеме: выставлялось необходимое давление в вакуумной камере и варьировалась вводимая СВЧ-мощность.

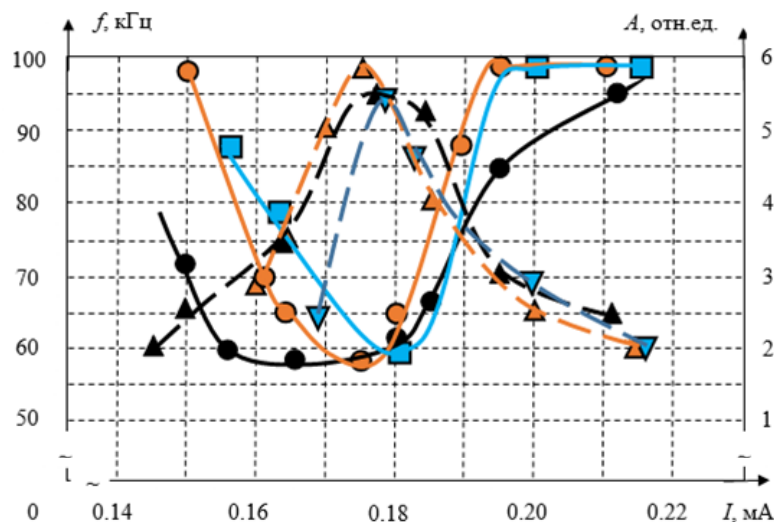


Рис. 1. Зависимость частоты колебаний f (сплошные линии) и их амплитуды A (пунктирные линии) от ионного тока насыщения I в цепи одиночного зонда для различных давлений газа P_{Ar} в вакуумной камере.

■, ▽ – $P_{Ar} = 6,6 \times 10^{-5}$ Торр; ○, ▲ – $P_{Ar} = 6,8 \times 10^{-5}$ Торр; ●, ▲ – $P_{Ar} = 7,0 \times 10^{-5}$ Торр.

Результаты измерений показывают наличие относительно узкой области значений ионных токов насыщения, в которой частота колебаний минимальна, а их амплитуда максимальна. При этом в этой области колебания хорошо сфазированы, их организация является четкой, что не реализуется при других значениях ионного тока.

На рис. 2 представлена зависимость уровня СВЧ-мощности, вводимой в резонатор, от давления рабочего газа в вакуумной системе в условиях регистрации максимальной амплитуды регистрируемых колебаний, а на рис. 3 зависимости амплитуды колебаний от вводимой в резонатор СВЧ-мощности для различных давлений.

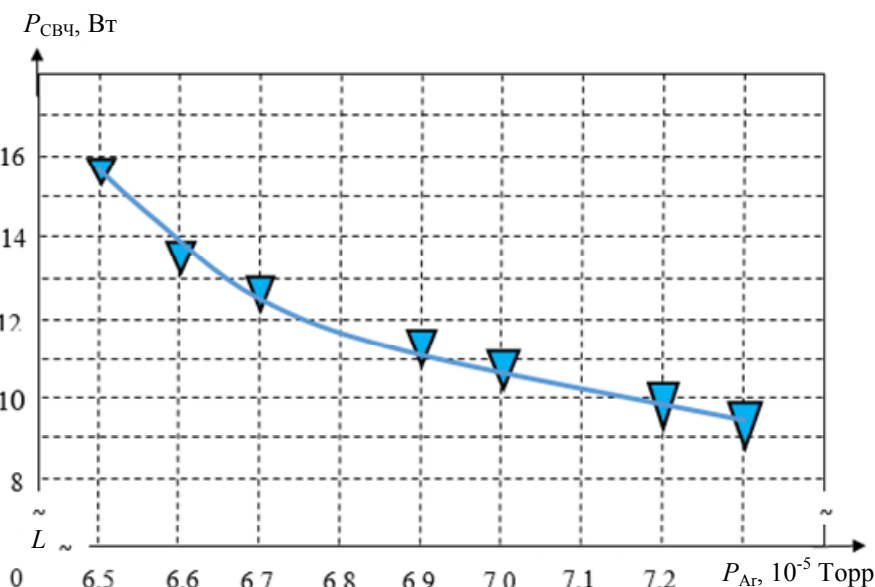


Рис. 2. Зависимость уровня СВЧ-мощности $P_{СВЧ}$, поступающей в резонатор, от давления газа в вакуумной камере P_{Ar} в условиях регистрации максимальной амплитуды колебаний ($A = 5,5 \pm 0,2$ отн. ед., ионный ток насыщения $I = 0,177 \pm 0,004$ мА при потенциале зонда $V_{pr} = -30$ В).

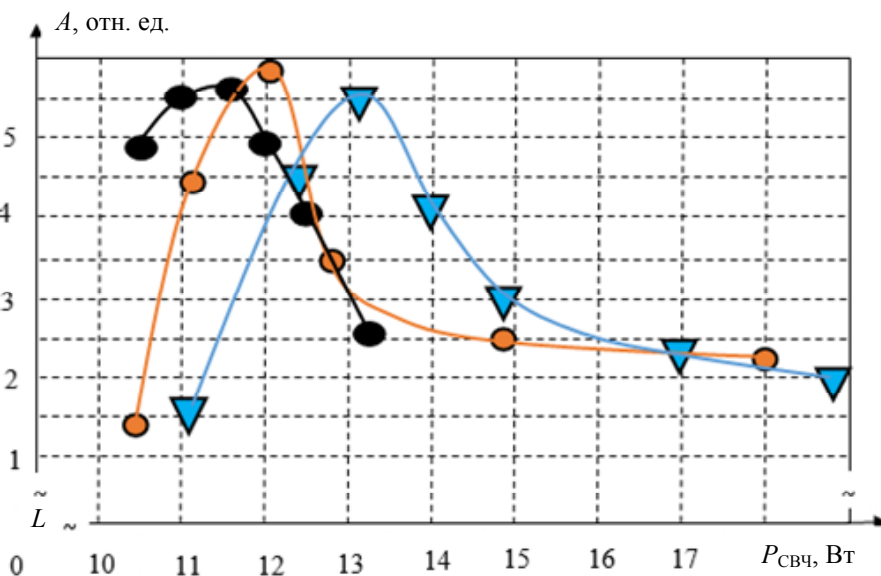


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний A от вводимой в резонатор СВЧ-мощности $P_{СВЧ}$ для различных давлений газа P_{Ar} в вакуумной камере.
 ∇ - $P_{Ar} = 6,6 \times 10^{-5}$ Torr; \circ - $P_{Ar} = 6,8 \times 10^{-5}$ Torr; \bullet - $P_{Ar} = 7,0 \times 10^{-5}$ Torr.

Исследования соотношений между колебаниями электронной и ионной компонент плазмы показали, что в режимах, соответствующих их максимальной амплитуде, максимуму амплитуды

колебаний ионной компоненты плазмы всегда соответствует минимум амплитуды колебаний электронной компоненты, при этом колебания ионов и электронов постоянно находятся в противофазе,

как и колебания ионной компоненты плазмы, регистрируемые с зондов, расположенных под углом $\pi/2$ друг относительно друга.

Представленные результаты экспериментального исследования показывают, что в плазменном кольце, создаваемом ЭЦР-разрядом в узком коаксиальном резонаторе, могут возбуждаться низкочастотные колебания, фазовая организация которых определяется давлением рабочего газа в системе и уровнем СВЧ-мощности, вводимой в резонатор. Колебания могут являться результатом возникновения бегущей в азимутальном направлении электростатической волны. При этом оптимальным условием ее существования может быть равенство протяженности плазменного кольца целому числу полудлин этой волны n . Исходя из этого, может быть определена фазовая скорость волны, которая для нашего случая ($f = 60$ кГц, $R = 1,7$ см) при $n = 4$ составляет $3,2 \times 10^5$ см/с. Представленное значение по порядку величины соответствует скорости ионно-звуковой волны (аргон, $T_e = 7 \pm 2$ эВ). В этом случае наличие зависимости частоты и амплитуды колебаний от давления рабочего газа в системе и уровня СВЧ-мощности, вводимой в резонатор, указывает на то, что существенную роль в устойчивом существовании этой волны могут играть геометрические размеры плазменного кольца, которые, как было ранее установлено [8], зависят от указанных параметров, а также от пространственной локализации ЭЦР-области.

Значительное уменьшение уровня СВЧ-электрического поля в резонаторе в изучаемых режимах формирования ЭЦР-плазмы может быть результатом его перераспределения в резонаторе, а также следствием высокоэффективной трансформации электромагнитной волны в электростатическую.

Заключение

В работе экспериментально установлено, что при давлении рабочего газа Ar в камере откачки $P_{Ar} = (6,6-7,0) \times 10^{-5}$ Торр и СВЧ-мощности, поступающей от генератора, на уровне 9–16 Вт в области ЭЦР формируется плазменное кольцо. При этом КСВ системы «генератор – резонатор» становится менее 1,02 (у ненагруженного резонатора КСВ составлял 1,3), а амплитуда СВЧ-поля в резонаторе уменьшается более чем на 90 %. Зондовые измерения показали, что в указанной области условий реализации разряда (давление рабочего газа, СВЧ-мощность) температура электронной компоненты плазмы составляет $T_e = 7 \pm 2$ эВ, а величина плавающего потенциала $V_{fl} = \pm 2$ В. При этом в плазме регистрируются низкочастотные

колебания как ионной, так и электронной компонент, частота и амплитуда которых зависят от давления рабочего газа и уровня вводимой в резонатор СВЧ-мощности.

Определены условия, при которых колебания частиц плазмы являются хорошо сфазированными и амплитуда колебаний максимальна. Установлено, что при этом колебания ионов и электронов всегда в противофазе, и что колебания ионов, регистрируемые в областях, расположенных под углом $\pi/2$ друг относительно друга на одинаковом расстоянии от центра плазменного кольца, также происходят в противофазе.

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что наличие низкочастотных колебаний в плазменном кольце может являться результатом возбуждения электростатической волны, распространяющейся в азимутальном направлении; при этом существование фазовой организации колебаний может быть связано с геометрическими размерами плазменного кольца и температурой электронной компоненты плазмы.

Результаты работы могут представлять практический интерес ввиду возможности их применения к анализу процессов возникновения колебаний в азимутально-симметричных плазменных образованиях и, в частности, в стационарных плазменных двигателях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 02.а03.21.0008, госзадание 3.2223.2017/ПЧ) и частично поддержана грантом РФФИ № 16-02-00640\16.

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-ей Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям (Минск. 1976). С. 12–13.
3. Veselovzorov A. N., Dlougach E. D., Pogorelov A. A., Svirsky E. B., Smirnov V. A. / Proc. IEPC-2011-060 (Wiesbaden. Germany. 2011).
4. Veselovzorov A. N., Dlougach E. D., Pogorelov A. A., Svirsky E. B., Smirnov V. A. / Proc. IEPC-2013-080 (Washington. USA. 2013).
5. Веселовзоров А. Н., Длугач Е. Д., Погорелов А. А., Свирский Э. Б., Смирнов В. А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 38.
6. Cannat F., Jarrige J., Elias P-Q., Packan D. / Space Propulsion – 2014 – 2980728. (Cologne. Germany. 2014).
7. Cannat F., Jarrige J., Lafleur T., Elias P-Q., Packan D. / Proc. IEPC-2015-90492 / ISTS-2015-b-90492 (Hyogo-Kobe. Japan. 2015).
8. Балмаинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 224.

Self-excitation of low-frequency oscillations in the plasma ring to be formed by the ECR discharge in a narrow coaxial resonator

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

RUDN University, Plasma Physics Lab.
6 Mikluho-Maklaya str. Moscow, 117198, Russia
E-mail: abalmashnov@rambler.ru; guiltyvine@gmail.com; v.v.kalashnikov@qip.ru;
stepinasvetlana@rambler.ru; anumnov@yandex.ru

Received April 12, 2017

Consideration is given to the experimentally obtained conditions for LF-oscillations which start up in a plasma ring to be formed by means of the ECR discharge (A_r) in a narrow coaxial resonator. The domain of the discharge parameters where these oscillations are regular has been determined. The registered oscillations are supposedly entailed from the appearance of an electrostatic wave to be propagating in the azimuthal direction.

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, ECR, coaxial resonator, oscillations.

REFERENCES

1. A. I. Morozov, Yu. V. Esipchuk, A. M. Kapulkin, V. A. Nevrovsky, and V. A. Smirnov, *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. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, in *Proc. IEPC-2011-060* (Wiesbaden. Germany. 2011).
4. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, in *Proc. IEPC-2013-080* (Washington. USA. 2013).
5. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, *Technical Physics* **83**, 38 (2013).
6. F. Cannat, J. Jarrige, P-Q. Elias, and D. Packan. In *Proc. Space Propulsion – 2014 – 2980728*. (Cologne. Germany. 2014).
7. F. Cannat, J. Jarrige, T. Lafleur, P-Q. Elias, and D. Packan, in *Proc. IEPC-2015-90492 /ISTIS-2015-b-90492* (Hyogo-Kobe. Japan. 2015).
8. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (3), 224 (2014).