

Возбуждение ионно-звуковой волны в аксиально-симметричном плазменном образовании

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

Установлена причина возникновения устойчивых синфазных НЧ-колебаний в плазменном кольце, формируемом ЭЦР-разрядом в узком коаксиальном резонаторе. Определена зависимость частоты НЧ-колебаний от природы рабочего газа, показывающая, что регистрируемые колебания являются следствием возникновения ионно-звуковой волны, распространяющейся в азимутальном направлении.

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный резонатор, ионно-звуковая волна.

Ссылка: Балмашинов А. А., Бутко Н. Б., Калашников А. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 16.

Reference: A. A. Balmashnov, N. B. Butko, A. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, Prikl. Fiz., No. 5, 16 (2018).

Введение

Колебательные процессы, возникающие в аксиально симметричных плазменных образованиях, могут существенно влиять на режимы работы используемых в различных областях техники устройств, в частности, в стационарных плазменных двигателях (СПД) [1–4], наличие азимутальных волн в которых приводит к увеличению скорости переноса электронов вдоль его канала и расходимости формируемого потока плазмы.

Экспериментальные исследования формирования плазмы в узком коаксиальном резонаторе электронно-циклотронным разрядом (ЭЦР) в аксиально-симметричном магнитном поле источника СЕРА-RI-2 [5] показали наличие условий (давление рабочего газа, вводимая СВЧ-мощность), при которых в азимутально-симметричной области регистрируются устойчивые низкочастотные колебания как ионной, так и электронной компонент. Были определены режимы, при которых колеба-

ния частиц плазмы являются хорошо сфазированными и их амплитуда 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 позволил предположить, что наличие низкочастотных колебаний в плазменном кольце может являться результатом возбуждения электростатической волны (ионно-звуковой), распространяющейся в азимутальном направлении. При этом существование устойчивой фазовой организации колебаний может быть связано с геометрическими размерами плазменного кольца, т. е. равенством его протяженности целому числу полудлин волн. Эти исследования получили развитие в работе [6], в которой представлены результаты, показывающие возможность формирования вне области ЭЦР взаимодействия аксиально-симметричного плазменного образования с концентрацией частиц, превышающей критическое значение для используемой частоты СВЧ-поля ($\omega_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад с^{-1}). Было сделано предположение, что формирование плазмы высокой концентрации может быть следствием протекания следующих процессов: в области верхнегибридного резонанса ($\omega_c = (0,5-0,7)\omega_0$, где ω_c – циклотронная частота электронов) происходит линейная трансформация электромагнитной волны в косую ленгмюровскую, которая, в свою очередь, распадается на новую косую ленгмюров-

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

Бутко Наталья 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, 8(495) 955-08-29.

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

Статья поступила в редакцию 22 мая 2018 г.

скую и ионно-звуковую волны. Ускорение электронов полем ионно-звуковой волны, не имеющей отсечки по плотности плазмы, обеспечивает наработку сверхкритической концентрации заряженных частиц.

Целью данной работы являлось подтверждение факта наличия ионно-звуковой волны в области $\omega_c = (0,5-0,7)\omega_0$, а также выявление причины формирования в ней устойчивых синфазных колебаний частиц плазмы.

Постановка задачи и метод ее решения

Задача исследований заключалась в исследовании спектров НЧ-колебаний в аксиально-симметричных плазменных образованиях, формируемых в источнике плазмы CERA-RI-2 ЭЦР-разрядом в различных газах, с целью идентификации типа волны, их возбуждающих.

Источник CERA-RI-2 (см. рис. 1) состоит из узкого цилиндрического коаксиального резонатора, одна из стенок которого представляет собой

электрод, который может перемещаться в продольном направлении, что позволяет осуществлять его частотную настройку.

Диаметр резонатора 7,0 см, высота 1,0 см. Ввод рабочего газа осуществлялся в радиальном направлении через отверстие, расположенное на цилиндрической стенке резонатора. В работе использовался магнетронный генератор со стабилизированным источником питания (магнетрон М-107, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,5 \times 10^{10}$ рад s^{-1}). СВЧ-мощность подавалась на осевой электрод резонатора. Поступающая и отраженная СВЧ-мощности измерялись с помощью направленного ответвителя прибором Я2М-66.

Азимутально-симметричное стационарное магнитное поле создавалось кольцевыми магнитами, содержащими патрубок из магнитомягкого материала. Распределение магнитного и СВЧ-электрического полей определяли расположение азимутально-симметричной области ЭЦР-взаимодействия, которая находилась на расстоянии $R_c = 1,2 \pm 0,2$ см от оси резонатора [6].

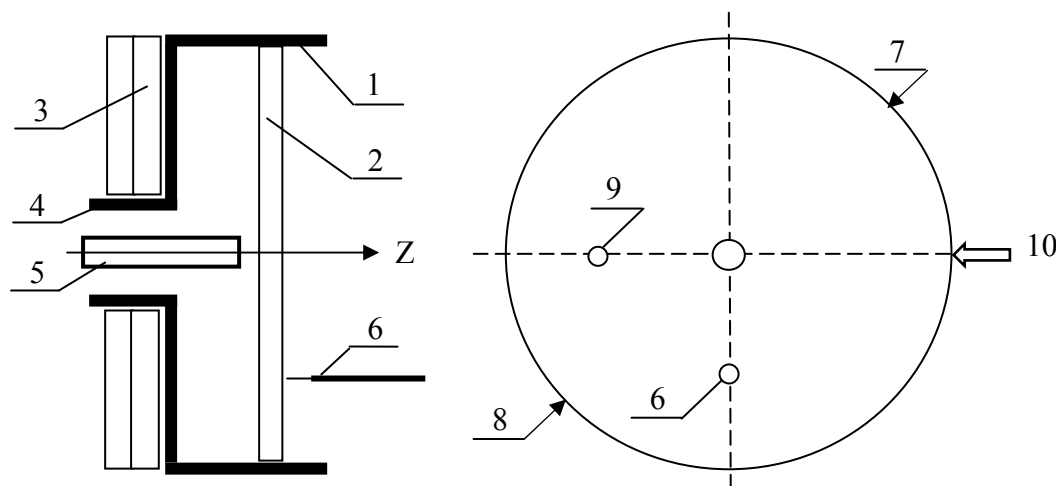


Рис. 1. Схема источника плазмы: 1 – корпус цилиндрического резонатора, 2 – торцевая стенка резонатора, 3 – кольцеобразные магниты, 4 – патрубок из магнитомягкого металла, 5 – центральный электрод коаксиального резонатора, 6 – электрический зонд, 7 – пристеночная СВЧ петлевая антенна, 8 – пристеночная радиально ориентированная СВЧ штыревая антенна, 9 – отверстие для регистрации светимости плазмы, 10 – ввод рабочего газа.

Торцевая стенка резонатора (2) была выполнена с периферийными отверстиями, обеспечивающими возможность откачки разрядной камеры.

Эксперименты по определению причины формирования устойчивых синфазных колебаний частиц плазмы проводились при отсутствии в стенке отверстий (6) и (9), при наличии отверстия (6) и при наличии отверстий (6) и (9). Отверстия располагались на расстоянии 2,1 см от оси резонатора под углом $\pi/2$ друг относительно друга. Радиальное расположение отверстий определили представленные в работе [6] результаты, показав-

шие, что при разряде в аргоне в области $\omega_c = (0,5-0,7)\omega_0$, находящейся на этом расстоянии, может быть сформировано плазменное кольцо с концентрацией частиц, превышающей критическое значение и что при этом регистрируются устойчивые колебания частиц плазмы с частотой 75–90 кГц.

Диаметр отверстия для ввода электрического зонда (зонд 6 на рис. 1) составлял 0,25 см. Зонд, активная часть которого была изготовлена из молибденовой проволоки (диаметр 0,05 см, длина 0,3 см), мог перемещаться в продольном направ-

лении. Потенциал на зонде относительно корпуса резонатора мог варьироваться. Зонд мог использоваться и как СВЧ-антенна. За стенкой резонатора напротив отверстия (9), диаметром 0,3 см, располагался фотодетектор. Сигнал с фотодетектора поступал на DC- и AC-входы осциллографа INSTEK GOS-620, что позволяло одновременно регистрировать изменение яркости излучения из плазмы и наличие колебаний яркости. Для определения спектра колебаний использовался прибор Hantek DSO5202P.

Регистрация вольт-амперных характеристик одиночного электрического зонда и их обработка осуществлялись в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения. Влиянием постоянного магнитного и СВЧ-электрического полей при обработке результатов пренебрегалось.

В работе использовался турбомолекулярный насос ТМН 500. Приведенные ниже значения давления рабочих газов в вакуумной системе установки измерялись традиционным образом. В качестве рабочих газов использовались ксенон, аргон, азот.

Полученные результаты и их обсуждение

Как отмечалось в работе [6], фактором, определяющим пространственную организацию ионно-звуковых колебаний в системах, описанных в работах [7, 8], являются граничные условия. Отсутствие граничных условий и наличие устойчивых (сфазированных) колебаний частиц плазмы с пространственным периодом, определяемом протяженностью пламенного кольца, позволяет сделать предположение о присутствии локальной неоднородности, стимулирующей процесс их формирования. С целью проверки этого предположения были проведены исследования, в которых торцевая стенка резонатора (стенка 2 на рис. 1) была выполнена в виде сплошного диска с периферийными отверстиями для откачки области СВЧ-разряда. Регистрация колебаний в плазме осуществлялась фиксацией отраженной от резонатора СВЧ-волны.

Было установлено, что при разряде в аргоне в области давлений и напряженностей СВЧ-

электрического поля, соответствующих области возникновения устойчивых колебаний [6], они не наблюдаются, регистрируются хаотичные несфазированные колебания. Аналогичные исследования с применением электрического зонда, способного перемещаться в продольном направлении, показали его определяющее влияние на процесс организации колебаний. Так, погружение зонда на расстояние более 0,3 см за торцевую стенку резонатора сопровождается их возникновением. Эксперименты, подтверждающие влияние локальной пространственной неоднородности в области резонатора на фазовую организацию колебаний частиц плазмы, были также проведены с одновременной регистрацией колебаний фотодетектором, зондом и в отраженной от резонатора СВЧ-волне. При этом было установлено отсутствие влияния потенциала на зонде в диапазоне ± 30 В на уровень сигнала с фотодетектора, на частоту и амплитуду регистрируемых фотодетектором колебаний.

С целью идентификации типа волны, формирующей колебания в плазме, проведены эксперименты по регистрации их частоты для СВЧ-разрядов в Хе, Ar, N₂. Постановка эксперимента осуществлялась следующим образом. Электрический зонд был погружен в резонатор на 0,5 см. В области давлений рабочего газа $(0,7-1,2) \times 10^{-4}$ Торр и микроволновой мощности 15–25 Вт, вводимой в резонатор, с использованием фотодетектора и электрического зонда, потенциал на котором составлял -30 В относительно корпуса резонатора, определялись режимы, при которых интенсивность излучения из плазмы и ток в цепи зонда максимальны. При этом, как было установлено, этим режимам соответствовала максимальная амплитуда регистрируемых колебаний, но электронная температура с точностью до 25 % оставалась неизменной, а колебания, регистрируемые зондом, находившимся под плавающим потенциалом, и фотодетектором, были в противофазе. Последнее указывает на то, что в исследуемых разрядах длины возбуждаемых НЧ-волн были одинаковы и определялись протяженностью пламенного кольца с $R = 2,1$ см ($\lambda = \pi R$). Характерные спектры НЧ-колебаний, соответствующие найденным режимам работы источника, представлены на рис. 2.

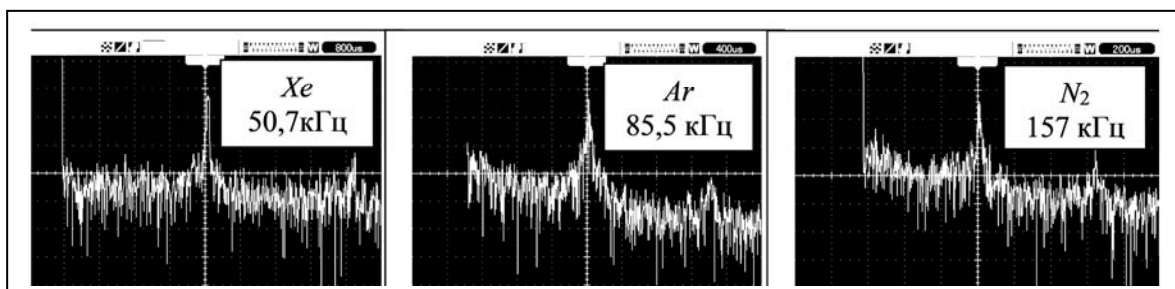


Рис. 2. Спектры низкочастотных колебаний ЭЦР разрядов в ксеноне, аргоне, азоте.

Следует отметить, что определение электронной температуры по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) электрического зонда в условиях его определяющего влияния на параметры разряда не является достаточно корректным, однако хорошее совпадение получаемых результатов для разрядов в различных газах ($T_e = 20 \pm 5$ эВ), а также их соответствие ранее представленным в работе [6] результатом (СВЧ-разряд в аргоне, $T_e = 17 \pm 4$ эВ), полученным с использованием зонда, расположенного на расстоянии 0,1 см от торцевой стенки резонатора (т. е. не влияющим на параметры плаз-

мы) позволяет считать утверждение о неизменности температуры электронов в исследуемых разрядах вполне допустимым.

На основе полученных результатов проведен расчет, показавший, что корень квадратный от отношения атомных масс используемых газов (M) обратно пропорционален частотам регистрируемых колебаний (см. таблицу). Ошибка в определении частоты определялась точностью определения максимальных амплитуд колебаний и не превышала 15 % от представленных на рис. 2 значений.

Таблица

Сопоставление отношений частот и атомных масс

(f_{Ar}/f_{Xe})	$(M_{Xe}/M_{Ar})^{1/2}$	(f_{Ar}/f_N)	$(M_N/M_{Ar})^{1/2}$	(f_{Xe}/f_N)	$(M_N/M_{Xe})^{1/2}$
1,65	1,81	0,54	0,59	0,32	0,33

Одновременно установлено, что во всех изучаемых режимах регистрируемый продольно ориентированной антенной ($R = 2,1$ см) уровень электрического СВЧ-поля в области формирования НЧ-колебаний уменьшался более чем на 95 %, а отраженная СВЧ-мощность не превышала 1 % от поступающей в резонатор. При этом измерения штыревой и петлевой антеннами, расположенными вблизи цилиндрической поверхности резонатора, показали отсутствие в нем перераспределения СВЧ-поля, а понижение сигнала с петлевой антенны составляло 30–40 % от величины, соответствующей отсутствию плазмы.

Представленные результаты показывают наличие условий, при которых в аксиально симметричной области плазмы, расположенной на расстоянии $R = 2,1$ см от оси резонатора, возбуждаются распространяющиеся в азимутальном направлении НЧ-волны, частота которых обратно пропорциональна корню квадратному из атомной массы рабочего газа (Xe, Ar, N₂).

Основываясь на результатах измерения электронной температуры, величина которой считалась неизменной, и измерений разности фаз колебаний с датчиков, расположенных под углом $\pi/2$ друг относительно друга, показывающих неизменность длин волн, можно утверждать, что регистрируемые волны являются ионно-звуковыми, т. е. волнами, фазовая скорость которых пропорциональна корню квадратному из отношения температуры электронов к атомной массе иона, а частота определяется произведением их фазовой скорости на длину волны. Ввиду симметрии системы и пространственной локализации области возбуждения НЧ-волны следует ожидать возможность возникновения в изучаемой структуре стоячей волны.

Заключение

В работе экспериментально установлено, что локальная неоднородность в области $\omega_c < \omega_0$ аксиально симметричного плазменного образования, формируемого ЭЦР-разрядом в узком коаксиальном резонаторе, является причиной возникновения НЧ-волны, распространяющейся в азимутальном направлении. Также установлены зависимости частот волн от атомной массы используемых в работе газов (Xe, Ar, N₂) в условиях равенства электронной температуры и длин волн, показывающие, что регистрируемые волны являются ионно-звуковыми, т. е. волнами, фазовая скорость которых пропорциональна корню квадратному из отношения температуры электронов к атомной массе иона, а частота определяется произведением их фазовой скорости на длину волны.

На основе представленных в работе результатов, можно считать, что за счет присутствия в резонаторе продольно ориентированного электрического зонда в области $\omega_c = (0,5-0,7)\omega_0$ происходит локальное увеличение напряженности электрического СВЧ-поля, что определяет область линейной трансформации электромагнитной волны в косую ленгмюровскую с последующим ее распадом на новую косую ленгмюровскую и ионно-звуковую волны. Предполагаем, что ввиду симметрии системы и локальности области возбуждения НЧ-волны следует ожидать возможность возникновения в изучаемой структуре стоячей волны.

Результаты работы могут представлять практический интерес в виду возможности их применения к анализу процессов возникновения колебаний в азимутально-симметричных плазменных образованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ
(соглашение № 3.2223.2017/4.6) и при частичной
поддержке (раздел 2) гранта РФФИ
№ 16-02-00640.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. А. / Труды 3-й Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям (Минск. 1976). С. 12–13.
2. Veselovzorov A. N., Dlougach E. D., Pogorelov A. A., Svirsky E. B., V. A. Smirnov V. A. / Proc. IEPC-2011-060 (Wiesbaden, Germany. 2011).

3. Veselovzorov A. N., Dlougach E. D., Pogorelov A. A., Svirsky E. B., V. A. Smirnov V. A. / Proc. IEPC-2013-080 (Washington, USA. 2013).
4. Веселовзоров А. Н., Длугач Е. Д., Погорелов А. А., Свирский Э. Б., Смирнов В. А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 38.
5. Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Калашиников В. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 37.
6. Balmashnov A. A., Kalashnikov A. V., Umnov A. M. // Plasma Physics Reports. 2018. Vol. 44. No. 6. P. 586.
7. Balmashnov A. A., Golovanivske K. S., Kamps E. / Proc. International Conference on Plasma Physics (Kiev, 1987). Vol. 2. P. 239.
8. Balmashnov A. A., Kalashnikov A. V., Kalashnikov V. V., Stepina S. P., Umnov A. M. // Plasma Physics Reports. 2018. Vol. 44. No. 1. P. 149.

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

Excitation of an ion-acoustic wave in the axial symmetric plasma configuration

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 str., Moscow, 117198, Russia
E-mail: abalmashnov@rambler.ru; anumnov@yandex.ru

Received May 22, 2018

The reason for the appearance of stable in-phase low-frequency oscillations in the plasma ring formed by the ECR discharge in a narrow coaxial resonator is established. The dependence of the frequency of LF-oscillations on the nature of the working gas is determined, showing that the recorded oscillations are a consequence of the occurrence of an ion-acoustic wave propagating in the azimuthal direction.

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, coaxial resonator, ion-sound wave.

REFERENCES

1. V. A. Smirnov, in *Proc. of the III All-Union Conference on Plasma Accelerators* (Minsk, 1976), pp. 12–13.
2. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, in *Proc. IEPC-2011-060* (Wiesbaden, Germany. 2011).
3. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, in *Proc. IEPC-2013-080* (Washington, USA. 2013).
4. A. N. Veselovzorov, E. D. Dlougach, A. A. Pogorelov, E. B. Svirsky, and V. A. Smirnov, *Tech. Phys.* **83**, 38 (2013).
5. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 37 (2017).
6. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, and A. M. Umnov, *Plasma Physics Reports* **44** (6), 586 (2018).
7. A. A. Balmashnov, K. S. Golovanivske, and E. Kamps, in *Proc. International Conference on Plasma Physics* (Kiev, 1987), Vol. 2. P. 239.
8. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov S. P. Stepina, and A. M. Umnov, *Plasma Physics Reports* **44** (1), 149 (2018).