

УДК 621

## **Ускорение частиц ЭЦР-плазмы электростатической волной, возбуждаемой амплитудной модуляцией СВЧ-поля**

*А. А. Балмашинов, Д. С. Чечуй*

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*Экспериментально найдены условия, при которых амплитудная модуляция СВЧ-поля (установка CERA-V) сопровождается ускорением ионной компоненты микроволновой плазмы. На основе полученных результатов делается предположение, что ускорение является следствием воздействия поля электростатической волны, возбуждаемой в области ЭЦР.*

Исследования предельных параметров потока частиц, формируемого в микроволновом источнике плазмы CERA-V [1], показали [2], что этот источник может быть использован как двигатель коррекции орбит лета-

тельных аппаратов, причем его параметры сравнимы с параметрами двигателя RITA-15 (Германия) при наличии такого преимущества над ним, как меньшая масса и больший временной ресурс. Было установлено, что используемый в CERA-V механизм ускорения частиц плазмы принципиально не позволяет существенно увеличить как ток, так и энергию ионной компоненты относительно достигнутых величин. В связи с этим были начаты исследования альтернативных механизмов ускорения, в частности, ускорения частиц плазмы электростатическими волнами, возбуждаемыми амплитудной модуляцией СВЧ-поля.

Эксперименты осуществлялись на установке CERA-V, схематически представленной на рис. 1.

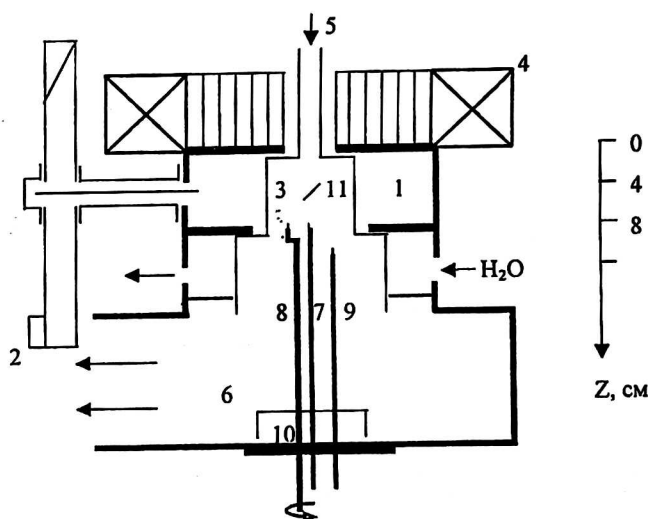


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — резонатор; 2 — магнетронный генератор; 3 — разрядная камера; 4 — электромагнит; 5 — ввод рабочего газа; 6 — вакуумная камера; 7—9 — одиночные электрические зонды; 10 — электростатические анализаторы; 11 — диагностическая петлевая СВЧ-антенна

В микроволновом источнике плазмы CERA-V использовался двухмодовый цилиндрический резонатор ( $TE_{111}$ ,  $E_{010}$ ), который возбуждался штыревой антенной, что обеспечивало его работу в одномодовом ( $TE_{111}$ ) режиме. СВЧ-поле создавалось магнетронным генератором М-105 мощностью до 800 Вт ( $\omega = 1,5 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>), модуляция анодного напряжения которого позволяла обеспечивать амплитудную модуляцию волны. Частота модуляции и ее глубина могли варьироваться. Соосно резонатору расположена цилиндрическая разрядная камера, изготовленная из кварцевого стекла. Стационарное, пространственно неоднородное магнитное поле создавалось электромагнитом, расположенным вблизи одной из торцевых стенок резонатора. Величина напряженности магнитного поля в области разрядной камеры могла варьироваться и достигать значения, соответствующего  $\omega_c/\omega = 1,4$ , где  $\omega_c$  — циклотронная частота электронов. Напуск рабочего газа (аргон) осуществлялся в разрядную камеру через патрубок 5, расположенный в области электромагнита. Откачка вакуумной системы установки производилась паромасляным насосом производительностью 200 л·с<sup>-1</sup>. Минимальное давление в вакуумной камере не превышало  $10^{-5}$  торр.

Диагностика параметров плазмы осуществлялась экранированными одиночными электрическими зондами, многосеточным электростатическим анализатором продольных энергий заряженных частиц и электростатическим анализатором с углом поворота  $\pi/2$ . Для диагностики микроволновых полей в резонаторе применялась петлевая антенна, расположенная в центральной плоскости резонатора со смещением  $\pi/2$  относительно антенны возбуждения.

Изучение параметров плазменного потока с помощью электростатических анализаторов показало, что при магнитном поле, обеспечивающем на расстоянии 1 см от торцевой части резонатора условие  $\omega_{c1} = (1,2-1,3)\omega$  и при модуляции СВЧ-поля в резонаторе на частоте  $f_M = (50-65)$  кГц (глубина модуляции  $M > 10\%$ ), регистрируются ускоренные ионы, энергия которых может достигать 150 эВ. Зависимости ионного тока и энергии ионов от величины магнитного поля ( $\omega_{c1}/\omega$ ) представлены на рис. 2.

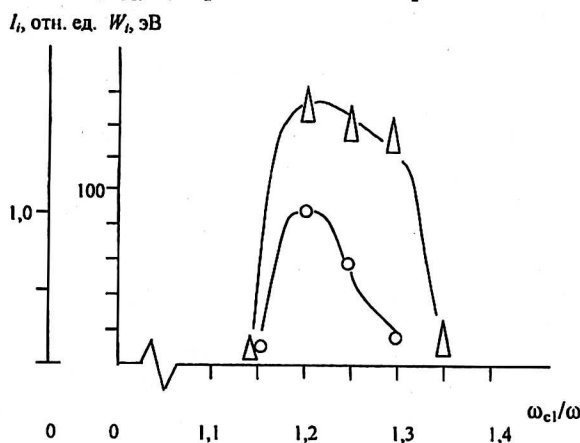


Рис. 2. Зависимости энергии  $W_i$  ( $\Delta$ ) и тока  $I_i$  ( $\circ$ ) ионной компоненты плазмы от величины  $\omega_{c1}/\omega$ ,  $p_{Ar} = 5 \cdot 10^{-4}$  торр;  $P = 400$  Вт;  $f_M = 55$  кГц;  $M = 20\%$

На рис. 3 показано влияние частоты модуляции СВЧ-поля в резонаторе на ток и энергию ионной компоненты в формируемом плазменном потоке.

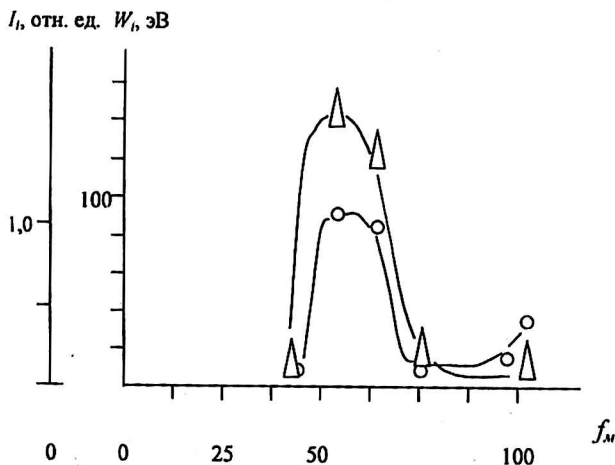


Рис. 3. Зависимости энергии  $W_i$  ( $\Delta$ ) и тока  $I_i$  ( $\circ$ ) ионной компоненты от частоты модуляции СВЧ-поля в резонаторе;  $\omega_{c1}/\omega = 1,2$ ;  $p_{Ar} = 5 \cdot 10^{-4}$  торр;  $P = 400$  Вт;  $M = 20\%$

Для режима работы установки, соответствующего максимальной энергии ионной компоненты, были проведены измерения концентрации частиц плазмы в области разрядной камеры. Концентрация определялась по ионному току насыщения в цепи одиночного электрического зонда 8 (см. рис. 1), калибровка которого была предварительно осуществлена с использованием 8-мм интерферометра и резонаторной методики в плазме с параметрами, близкими к исследуемым. Неподвижный зонд 9 (см. рис. 1) в этих и последующих измерениях, производимых с помощью зондов в области разрядной камеры, служил для регистрации изменений в параметрах создаваемой плазмы.

Экспериментально установлено, что в режимах, соответствующих возникновению потоков ускоренных ионов, концентрация плазмы в разрядной камере более чем в 40 раз ( $n > 40n_c$ ) превышает критическое значение для используемой частоты поля накачки ( $n_c = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), и перемещение зонда не приводит к изменениям в параметрах плазмы на выходе источника (ионный ток насыщения, плавающий потенциал) более чем на 10%. Отсутствие заметного влияния местоположения зондов, находящихся в плазме, с концентрацией, превышающей критическое значение на параметры формируемого плазменного потока, объясняется тем, что в этих условиях проникновение СВЧ-поля в плазму отсутствует, следствием чего является неизменность его структуры в резонаторе, а механизм наработки плазмы высокой концентрации связан с эффектами, протекающими на границе плазменного столба [3].

Измерения амплитуды колебаний электрических зарядов в плазме в радиальном и продольном направлениях осуществлялись экранированными зондами 7 и 8 (см. рис. 1), сигналы с последних поступали на осциллограф, развертка луча которого была синхронизирована сигналом, модулирующим работу магнетронного генератора. Активная часть зонда 8 представляла собой шарообразную поверхность, а активная часть зонда 7 была помещена внутрь металлического экрана цилиндрической формы. Результаты измерений представлены на рис. 4.

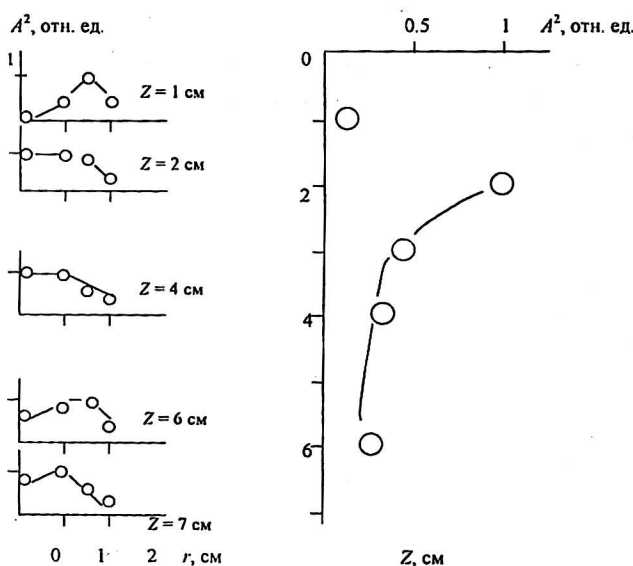


Рис. 4. Радиальное и продольное распределения квадратов амплитуд колебаний электрических зарядов в плазме  $A^2$ ;  $\omega_{c1}/\omega = 1,2$ ;  $p_{Ar} = 5 \cdot 10^{-4}$  торр;  $P = 400$  Вт;  $f_m = 55$  кГц;  $M = 20$  %

Представленные результаты показывают:

в области  $z = 1$  см ( $\omega_c / \omega = 1,2$ ) и  $z = 6$  см ( $\omega_c / \omega \approx 0,5$ ) в радиальном направлении создается стоячая волна, которая ранее в исследованиях, проводимых в однородном магнитном поле, была нами идентифицирована как ионно-звуковая [3, 4];

в области  $z \approx 2$  см ( $\omega_c / \omega = 1$ ) возникает продольная электростатическая волна, распространяющаяся в сторону спадающего магнитного поля. Области возникновения этой волны соответствует условие электронного циклотронного резонанса.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что формирование потока плазмы с ускоренными ионами сопровождается следующими процессами:

в результате амплитудной модуляции СВЧ-поля в области резонатора ( $z \approx 1$  см) формируется плазма с концентрацией, более чем в 40 раз превышающей критическое значение для используемой частоты поля накачки как следствие действия поля стоячей в радиальном направлении ионно-звуковой волны;

в области магнитных полей, соответствующих условию  $\omega_c / \omega > 1$ , в плазменном столбе с  $n > n_c$  возбуждается вистлер, амплитудная модуляция которого определяется режимом работы магнетронного генератора. Вистлер распространяется вдоль плазменного столба в область ЭЦР;

в области ЭЦР ( $z \approx 2$  см) вистлер взаимодействует с электронной компонентой плазмы, при этом поперечная энергия частиц определяется амплитудой вистлера;

движение поперечно-нагретых электронов в спадающем магнитном поле сопровождается их продольным ускорением, возникает пульсирующее продольное движение частиц, стимулирующее возникновение бегущей в продольном направлении электростатической волны;

поле бегущей волны захватывает и ускоряет ионную компоненту плазмы.

В связи с тем, что в условиях экспериментов энергия ионов достигала 150 эВ и при этом соответствующая этой энергии разность потенциалов в плазме зарегистрирована не была, мы предполагаем, что их ускорение осуществлялось бегущей в продольном направлении с нарастающей фазовой скоростью электростатической волной. Идентификация волны позволит оптимизировать режим работы разрабатываемого источника и сделать вывод о возможности использования примененной схемы ускорения ионного потока в двигателях коррекции орбит летательных аппаратов.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Balmashnov A. A.* // JVST. 1996. V. 14. № 1. P. 471.
2. *Балмашинов А. А., Чечуй Д. С.*: Тр. конф. ФГР-2000. — Рязань, 2000. С. 43.
3. *Balmashnov A. A., Golovanivsky K. S., Kamps E.*: Проср. ICSP. — Kiev, 1987. V. 2. P. 239.
4. *Балмашинов А. А., Голубев А. К.* Способ генерации плазмы. А. с. 1651760 СССР. 1991.

*Работа получила поддержку в рамках гранта  
Министерства образования Российской Федерации.*

## **ECR-plasma acceleration due to electrostatic wave excited by amplitude modulate of electromagnetic field**

*A. A. Balmashnov, D. S. Chechyi*  
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

*The conditions of microwave plasma ion acceleration due to amplitude modulate high frequency field in CERA-V device are experimentally established. Based on the obtained results a conclusion about electrostatic wave field action to ion acceleration has been done.*