

УДК 621

Безэлектродная система экстракции многозарядных ионов в источнике CERA-Z

В. В. Андреев, А. А. Балмашинов, А. М. Умнов

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Начата работа по созданию одноступенчатого резонаторного микроволнового источника многозарядных ионов CERA-Z. Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность аксиального вывода ионной компоненты из резонаторного микроволнового источника плазмы полем электростатической волны в условиях $\omega_c > \omega$. Установлено влияние градиента стационарного магнитного поля на ток и энергию ионной компоненты плазмы.

Интерес к электронно-циклотронно-резонаторным (ЭЦР) разрядам как к источникам потоков многозарядных ионов (ПМИ) обусловлен его безэлектродным характером, что вызывает резкое снижение примесей в создаваемом потоке ионов, увеличение временного ресурса источника, его надежности и стабильности в работе. Источники этого типа не требуют технического обслуживания в течение длительного времени. При этом относительно высокая энергия электронной компоненты плазмы (десятки, сотни килоэлектрон-вольт), достигаемая при относительно низком давлении рабочего газа (10^{-4} – 10^{-7} торр), позволяет получать достаточно интенсивные потоки ионов высокой зарядности.

Традиционно для создания потоков многозарядных ионов используется двухступенчатая схема. Первая ступень служит для создания "холодной" плазмы высокой концентрации (давление рабочего газа в ней достаточно велико). Плазма из первой ступени распространяется вдоль ведущего магнитного поля во вторую ступень с низким давлением нейтрального газа, где происходит нагрев электронной компоненты и формируются многозарядные ионы, экстракция которых осуществляется системой электродов специальной конфигурации. Низкое давление во второй ступени необходимо ввиду существенного влияния эффекта перезарядки на потери ионной компоненты плазмы, причем сечение перезарядки (σ) растет с ростом зарядности иона. Так, для перехода из зарядового состояния i в состояние $i-1$ оно определяется выражением [1]

$$\sigma_{i,i-1} = 1,43 \cdot 10^{-12} i^{1,17} V_{01}^{-2,76}, \text{ см}^2,$$

где V_{01} — первый ионизационный потенциал (эВ) нейтрального атома.

Обычно сечение перезарядки на три-четыре порядка выше соответствующих сечений ионизации электронным ударом, однако скорости реакций пропорциональны скоростям взаимодействующих частиц, а нейтральные атомы движутся значительно медленнее нагретых электронов.

По двухступенчатой схеме работают такие известные источники многозарядных ионов как Supermafios, Micromafios, Minimafios-16, Caprice, Minimafios-18 — во Франции; Hiska, Liska, Pre-ISIS I, Pre-ISIS II — в Германии; Ecrevette, Ecrevis, Octopus — в Бельгии; ONRL-ECR, LBL-ECR, RT-ECR, SC-ECR, PHECR — в США; RICE — в Японии; RT-ECR — в Швеции.

Нами предлагается одноступенчатая схема источника ПМИ [2], отличающаяся от известных:

способом создания микроволновой плазмы со сверхкритической концентрацией, степень ионизации частиц в которой превышает 90 % (в условиях $\omega_c \geq \omega$ осуществляется амплитудная модуляция СВЧ-поля ($f = \omega/2\pi = 2,45$ ГГц) на частоте, близкой к частоте ионно-звуковых колебаний, ω_c — электронная циклотронная частота);

способом нагрева электронной компоненты плазмы, заключающемся в возбуждении вистлера, образующего в осевом направлении стоячую волну;

способом экстракции ионной компоненты плазмы, заключающемся в создании в области одной из магнитных пробок источника условий для возникновения модуляционной неустойчивости вистлера, приводящей к формированию узкого осевого желоба плотности плазмы и возбуждению в нем кривой ленгмюровской волны с нарастающей фазовой скоростью, ускоряющей в продольном направлении "холодную" фракцию электронов. Возникающий при этом амбиполярный потенциал обеспечивает экстракцию ионной компоненты из плазмы.

Основанием для начала работ по созданию такого источника ПМИ были исследования, результаты которых кратко представлены ниже.

Существуют микроволновые источники, степень ионизации плазмы в которых может достигать 90 % и выше в условиях, когда давление в окружающем плазму объеме составляет $10^{-4} + 10^{-5}$ торр. Известны также режимы работы источников, при которых одновременно возможны формирование плазмы сверхкритической концентрации для данной частоты поля накачки и нагрев электронной компоненты плазмы во всем ее объеме. К источникам такого типа относятся системы, работающие в режиме $\omega_c \geq 2\omega$, где $\omega_c = eB/mc$; e , m — заряд и масса электрона, соответственно; B — индукция стационарного магнитного поля; c — скорость света в вакууме. Несмотря на то, что указанная область частот соответствует области канализации вистлера в плазменном столбе с горбом плотности, видимо, в этих установках работает механизм, связанный с турбулизацией параметров плазмы, так как их энергетическая эффективность достаточно низкая. Более энергетически выгодные режимы были реализованы в установках серии CERA. Так, в источнике плазмы, описанном в работе [3], в условиях $\omega_c \leq 0,5\omega$, в радиально ограниченной плазме, электромагнитным полем TE_{111} -моды круговой поляризации, возбуждаемой в цилиндрическом резонаторе, был реализован процесс линейной трансформации электромагнитной волны (EM) в верхнегибридную (UH) с последующим ее распадом на новую верхнегибридную (UH_1) и ионно-звуковую (S) волны

$$EM \rightarrow UH \rightarrow UH_1 + S,$$

что обеспечивало режим поддержания плазмы с концентрацией, примерно в 100 раз превышающей критическое значение ($n_c = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для $\omega = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$) при степени ионизации в центральной области плазменного цилиндра более 90 %. С точки зрения источника ПМИ существенным является то, что в условиях формирования плазмы в радиальном направлении плазменного столба формируется стоячая низкочастотная волна (ионный звук), определяющая осевую электростатическую яму для ионной компоненты плазмы.

Описанный выше режим не обеспечивает возможности нагрева электронов и, следовательно, наработки многозарядных ионов. Однако, как было установлено экспериментально [4], аналогичный режим формирования сверхплотной плазмы может быть реализован в условиях $\omega_c \geq \omega$ амплитудной модуляции высокочастотного поля на частоте, соответствующей существованию стоячей ионно-звуковой волны в плазменном столбе данного диаметра, причем глубина модуляции может не превышать 10 %. При этом использование правополяризованного электрического высокочастотного поля обеспечивает его проникновение в плазму со сверхкритической концентрацией в "режиме вистлера" и нагрев электронной компоненты плазмы. Факт распространения вистлера в плазменном шнуре высокой концентрации с "горбом" плотности частиц при $\omega_c \geq \omega$ следует из соответствующего этому условия:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} > 0,$$

где k — волновое число, которое, как было показано теоретически на основе дисперсионного соотношения, определяется как

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 + \frac{\omega_p^2 Z(\zeta)}{\sqrt{2}\omega k V_t},$$

где ω_p — плазменная частота электронов;

$Z(\zeta)$ — плазменная дисперсионная функция, $\zeta = (\omega + iv_e - \omega_c) / \sqrt{2} V_t$,
 $V_t = [kT_e / m]^{1/2}$;

T_e — температура электронов;

v_e — эффективная частота столкновений электронов, и экспериментально в работе [5] выполняется не только в области $\omega_c \geq 2\omega$, но и в указанной области частот ($\omega_c \geq \omega$).

Таким образом, могут быть реализованы процессы обеспечивающие как наработку многозарядных ионов, так и их электростатическое удержание в радиальном направлении. Более того, в описываемой системе может быть реализован безэлектродный механизм экстракции ионной компоненты плазмы организацией в осевой области плазменного столба электростатической моды Трайвелписа-Гулда (косая ленгмюровская волна) с нарастающей фазовой скоростью, от величины, соответствующей тепловой скорости электронов, до некоторой, обеспечивающей эффективный отбор частиц (ионов). Возможность реализации этого процесса основывается на исследованиях [6], показывающих, что в условиях

$$\omega_p^2 r_p^2 c^{-2} \ll 1,$$

где r_p — радиус плазменного канала, вистлер трансформируется в моду Трайвелписа-Гулда, фазовая скорость которой растет с ростом величины стационарного магнитного поля, и на результатах работы [7], где было установлено, что распространение вистлера вдоль плазменного столба с "горбом"

плотности в условиях $\partial^2\omega/\partial k^2 > 0$ сопровождается его фокусировкой, увеличением плотности энергии, возникновением модуляционной неустойчивости, следствием развития которой является организация в осевой области плазменного столба канала с пониженной плотностью частиц. Этот механизм был успешно реализован на установке для безэлектродного ускорения ионной компоненты плазмы CERA-A [8, 9].

Можно предположить, что описанный способ экстракции ионной компоненты плазмы позволит увеличить область сбора многозарядных ионов и тем самым обеспечит более эффективный их отбор из системы.

Так как в установке CERA-A для создания потока плазмы с ускоренными ионами использовалась спиральная волноводная структура, а в предлагаемом источнике многозарядных ионов предполагается применить резонаторную систему, то является необходимым проведение экспериментальных исследований возможности реализации процессов, аналогичных происходящим в CERA-A, в целях аксиального вывода ионной компоненты из резонаторного микроволнового источника плазмы в условиях $\omega_c > \omega$.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

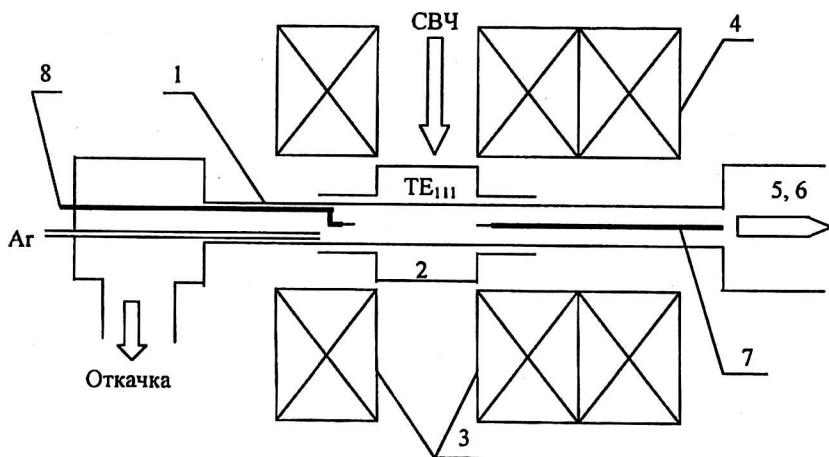


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Плазма создавалась в трубе 1 из кварцевого стекла диаметром 6 см, правополяризованным СВЧ-электрическим полем ($\omega = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$), возбуждаемым в TE_{111} резонаторе 2 магнетронным генератором мощностью до 800 Вт. Частота f_m и глубина M модуляции СВЧ-поля могли варьироваться. Стационарное магнитное поле формировалось тремя соленоидами 3, два из которых были включены последовательно. Ток в соленоидах 3 и 4 мог варьироваться, что обеспечивало возможность создавать в области резонатора различные градиенты магнитного поля при сохранении его минимального значения (рис. 2).

Диагностика параметров плазмы осуществлялась пятисеточным электростатическим анализатором продольных энергий заряженных частиц 5, электростатическим анализатором 6 (см. рис. 1) с углом поворота $\pi/2$ и одиночными электрическими зондами 7, 8. Откачка системы обеспечивала минимальное давление в вакуумной системе $4 \cdot 10^{-6}$ торр. В качестве рабочего газа использовался аргон.

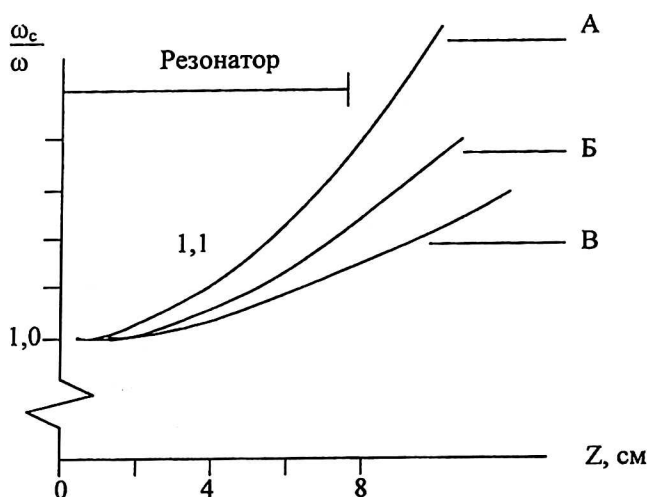


Рис. 2. Профили магнитного поля для различных токов в соленоидах:

I_1 — ток в соленоидах 3; I_2 — ток в соленоиде 4:

A — $I_1 = 19,3$ А; $I_2 = 30$ А; Б — $I_1 = 20,2$ А; $I_2 = 20$ А; В — $I_1 = 21,3$ А; $I_2 = 10$ А

Экспериментально было установлено, что при давлении рабочего газа $p_{\text{Ar}} = (4-8) \cdot 10^{-4}$ торр, минимальном значении магнитного поля в резонаторе, соответствующем $\omega_c = (1,0-1,2)\omega$, СВЧ-мощности, поступающей в резонатор $P > 400$ Вт, в условиях амплитудной модуляции СВЧ-поля на частоте $f_m = (55-75)$ кГц и глубине модуляции $M = (20-40)\%$ в области резонатора формируется плазма с концентрацией ($n > 3,5 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$), более чем в 50 раз превышающей критическое значение ($n_c = m\omega^2/4\pi e^2 = 7 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$) для используемой частоты СВЧ-поля. Измерения осуществлялись электрическими зондами, один из которых мог перемещаться вдоль оси разряда 7, а другой 8 был расположен на оси, но находился вне области действия СВЧ-поля. Концентрация плазмы определялась по величине ионного тока насыщения на зонд 7, калибровка которого была произведена предварительно с использованием 8-мм интерферометра и резонаторной методики. Зонд 8 позволял регистрировать изменения в параметрах плазмы, связанные с осевым перемещением зонда 7. Было установлено, что при $n > n_c$ и $\omega_c > \omega$ такие изменения не наблюдаются.

Измерения параметров формируемого в направлении соленоида 4 плазменного потока осуществлялись пятисеточным электростатическим анализатором продольных энергий заряженных частиц и электростатическим анализатором с углом поворота $\pi/2$. Электрические зонды 7 и 8 отсутствовали. Установлено, что при минимальной величине магнитного поля, соответствующей $\omega_c = (1,15 \pm 0,05)\omega$ при токах в соленоиде (4) $I_2 = 20-35$ А, наблюдается узкий пучок плазменного потока (диаметр $2r_p \leq 1,5$ см), продольная энергия ионной компоненты в котором может достигать $W_i = 60$ эВ. Зависимости энергии ионной компоненты и ионного тока от величины тока в соленоиде 4, определяющего градиент магнитного поля, представлены на рис. 3.

Пороговый характер возникновения узкого пучка плазмы в направлении нарастающего магнитного поля и резонансный характер зависимости энергии и тока ионов от градиента магнитного поля указывают на возможность реализации в изучаемой системе механизмов, о которых говорилось выше и которые были реализованы в установке CERA-A [9].

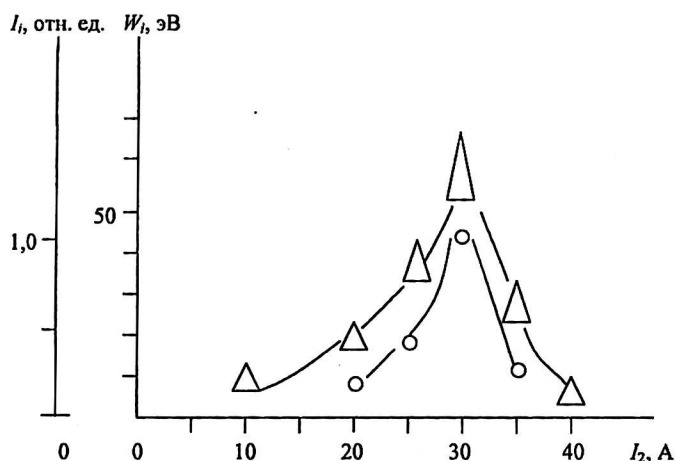


Рис. 3. Зависимости энергии W_1 (Δ) и тока I_1 (\circ) ионной компоненты от величины тока в соленоиде 4 при минимальной величине магнитного поля в области резонатора, соответствующей $\omega_c = 1,15\omega$; $p_{Ar} = 4,5 \cdot 10^{-4}$ торр; $P = 500$ Вт; $f_m = 55$ кГц; $M = 20$ %

В связи с тем, что аналитическое описание процессов, происходящих в изучаемой системе, представляет значительные трудности, предполагается проведение машинного эксперимента с использованием метода частиц в ячейках. В случае адекватности экспериментальных результатов и результатов машинного счета будет произведена оптимизация условий экстракции ионной компоненты из резонаторного источника плазмы.

Литература

1. Muller A., Salzborn E. //Phys. Letters. 1977. V. 62A. P. 391.
2. Balmashnov A. A.: Proc. Int. University Conf. "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". — St.-Petersburg, 1999. P. 432.
3. Balmashnov A. A., Golovanivsky K. S., Kamps E.: Proc. ICPP. — Kiev, 1987. V. 2. P. 239.
4. Балмашинов А. А., Голубев А. К. Способ генерации плазмы: А. с. 1651760 СССР, 1991.
5. Ohkubo K., Tanaka S.//J. Phys. Soc. Japan, 1974. V. 36. P. 843.
6. Sugai H., Sato M., Ido K., Takeda S.//Ibid., 1978. V. 44. P. 1953.
7. Balmashnov A.A.//Phys. Letters, 1980. V. 79A. P. 402.
8. Balmashnov A. A., Levchenko A. M.: Proc. 4-th ICIS, -Darmstadt, Germany, 1991. P. 112.
9. Балмашинов А. А., Левченко А. М. Плазменный инжектор: А. с. 1679949 СССР, 1991.

Работа получила поддержку в рамках гранта
Министерства образования Российской Федерации.

High charge ions electroless extraction in the CERA-Z device

V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. M. Umnov
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The research of devising of a one staged resonant source of multicharged ions CERA-Z has been developed. The experimental results demonstrating the possibility of electrodeless ion extraction from the microwave plasma source resonant cavity under $\omega_c > \omega$ condition are presented.