

## ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ВЧ-ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

В. И. Возный<sup>1</sup>, В. И. Мирошниченко<sup>1</sup>, С. Н. Мордик<sup>1</sup>,  
В. Е. Сторишко<sup>1</sup>, Б. Сулкио-Клефф<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы*

<sup>2</sup> *Институт ядерной физики Университета г. Мюнстер, Германия*

Рассмотрены возможности повышения плотности плазмы в ВЧ-источниках ионов с целью увеличения яркости пучка. Повышение плотности плазмы источника достигается за счет создания эффективного ВЧ-разряда во внешнем магнитном поле. Для создания продольного магнитного поля применена компактная магнитная система с постоянными магнитами и ферритами кольцевой формы. В источнике реализован ВЧ-разряд с внешним магнитным полем ( $\sim 40$  Гс) с плотностью аргоновой плазмы  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при 40 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности ( $f_{\text{ВЧ}} = 27,12$  МГц). Плотность ионного тока внутри вытягивающего электрода источника составляла 10 мА/см<sup>2</sup> при диаметре эмиссионного отверстия 0,6 мм. Измерения тока и его профиля проводились на стенде испытания ионных источников. Стенд позволяет производить измерения тока, эмиттанса, массового состава и энергетического разброса пучка ионов, а также уровень вводимой в плазму ВЧ-мощности.

### Введение

Основным направлением усовершенствования сканирующего ядерного микронзонда (ЯМЗ) является повышение пространственной разрешающей способности, под которой понимают не только уменьшение размеров пучка на мишени, но и обеспечение при этом достаточной величины тока ( $\sim 100$  пА). Поскольку величина тока на мишени определяется произведением яркости пучка ионов на фазовый объем, задаваемый объектной и угловой диафрагмами зондоформирующей системы, то для получения большего тока при максимально достижимом фазовом объеме в ЯМЗ следует использовать источники ионов с наибольшей яркостью. Необходимым условием получения высокой яркости пучка в ВЧ-источниках ионов (наиболее часто используемых в качестве инжекторов ЯМЗ) является обеспечение высокой плотности плазмы источника. Одним из возможных вариантов повышения плотности плазмы является создание в ВЧ-источнике ионов эффективного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем [1 - 5]. В данной работе предложены конкретные варианты реализации компактного ВЧ-источника ионов с повышенной плотностью плазмы. Реализованы режимы работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

### Требования, предъявляемые к источнику ионов ЯМЗ

Источник ионов ЯМЗ должен обеспечивать следующие основные параметры: высокую яркость однородного и контролируемого по составу ионов в пучке, с малым разбросом по импульсу ( $\delta p/p$ ) ионного пучка; большой срок службы (не менее 500 ч); экономичный режим работы (источник должен работать с минимально возможным количеством рабочего вещества, с минимальным уровнем вводимой в плазму мощности); малые габаритные размеры самого источника ионов, его систем питания и газообеспечения.

По совокупности параметров ВЧ-источник ионов является одним из наиболее перспективных для использования в ЯМЗ. Данный тип источника ионов имеет целый ряд достоинств: значительный срок службы (более 1000 ч), стабильность ионно-оптических параметров, высокую степень ионизации газа, компактность, достаточно большой ионный ток (1 - 100 мкА) и высокую яркость ( $B_n \sim 10^9 - 2 \cdot 10^{10}$  Ам<sup>-2</sup> рад<sup>-2</sup>).

Теоретический предел яркости источника при известных  $T_e$ ,  $T_i$  и  $n$  можно рассчитать по формуле [6]

$$B_n = \frac{I}{(\pi \varepsilon_n)^2} = \frac{I}{(2\pi R)^2} \left( \frac{kT_i}{m_i c^2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $m_i$  - масса иона;  $c$  - скорость света в вакууме;  $k$  - постоянная Больцмана;  $I = \pi R^2 j_+$  - ток эмиссии ионов;  $R$  - радиус эмиссионной плазменной поверхности ионного источника;

$j_+ = 0,4qn_+ \sqrt{\frac{2kTe}{m_i}}$  - плотность эмиссионного тока;  $\varepsilon_n = \beta\gamma R \alpha_t$  - нормализованный эмиттанс

эмиссии ионов;  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ ;  $v$  - скорость ионного пучка,  $\alpha_t = \frac{p_t^{(\max)}}{p_z} = \frac{2m_i V_{Ti}}{m_i \beta \gamma c}$  -

половинный угол эмиссии;  $V_{Ti} = \sqrt{\frac{kT_i}{m_i}}$  - тепловая скорость ионов. Выражение для

максимума поперечного импульса  $p_t^{(\max)} = 2m_i V_{Ti}$  получено в предположении, что распределение скоростей частиц в плазме является максвелловским, т. е.

$$f(v) = \exp\left(-\frac{mv^2}{kT_i}\right).$$

Таким образом, высокояркостные плазменные ионные источники должны иметь плазму с высокой ионной плотностью и высокой электронной температурой. В то же время ионная температура должна быть низкой, чтобы получать ионные пучки с малым разбросом по импульсу и малым эмиттансом. Высокая яркость пучка может быть получена при экстракции пучка с высокой плотностью тока и малым эмиттансом. Следует, однако, отметить, что для конкретных ионно-оптических систем существуют ограничения на плотность тока, задаваемые законом Ленгмюра - Чайлда [7, 8]. При повышении полного тока пучка за счет увеличения плотности эмиссионного тока для сохранения приемлемой величины тока размер эмиссионного отверстия может быть уменьшен, как следствие может быть уменьшен нормализованный эмиттанс эмиссии ионов.

Существующие ВЧ-источники, используемые в качестве инжекторов ЯМЗ, работают либо в Е-режиме (емкостного ВЧ-разряда) с плотностью плазмы  $n \sim 10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , либо в Н-режиме (индуктивного ВЧ-разряда) с плотностью плазмы  $n \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Для сравнения ВЧ-источники плазмы с магнитным полем, работающие в W-режиме (индуктивного ВЧ-разряда с магнитным полем), имеют плотность плазмы  $n \sim 10^{12} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  [1, 2]. Теоретический предел яркости аргонового пучка при плотности плазмы  $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температурах электронов  $T_e \sim 5 \text{ эВ}$  и ионов  $T_i \sim 0,1 \text{ эВ}$  будет равен  $B_n \sim 0,8 \cdot 10^{14} \text{ Ам}^{-2} \text{ рад}^{-2}$ . Данная величина яркости может быть сравнима с величиной яркости жидкометаллических источников ионов  $B_n \sim 10^{14} \text{ Ам}^{-2} \text{ рад}^{-2}$  [9].

### Описание экспериментального стенда для испытания источников ионов

В ИПФ НАН Украины разработан, изготовлен и отлажен экспериментальный стенд, позволяющий производить экспрессные измерения фазовых характеристик, эмиттанса, яркости, полного тока, профиля тока, энергетического разброса и массового состава пучка ионов, извлекаемого из источника ионов. Стенд позволяет производить испытание источников ионов, используемых в микронзондах, имплантерах, литографах, ускорителях ионов. Данный стенд позволяет, в частности, решать задачу выбора наиболее перспективных для ЯМЗ высокояркостных режимов работы ВЧ-источника ионов, традиционно используемого в



качестве инжектора ЭСУ ЯМЗ. Результаты этих исследований позволяют определить перспективные направления модернизации ВЧ-источников ионов, используемых для получения высокоэнергетичных ионных микропучков.

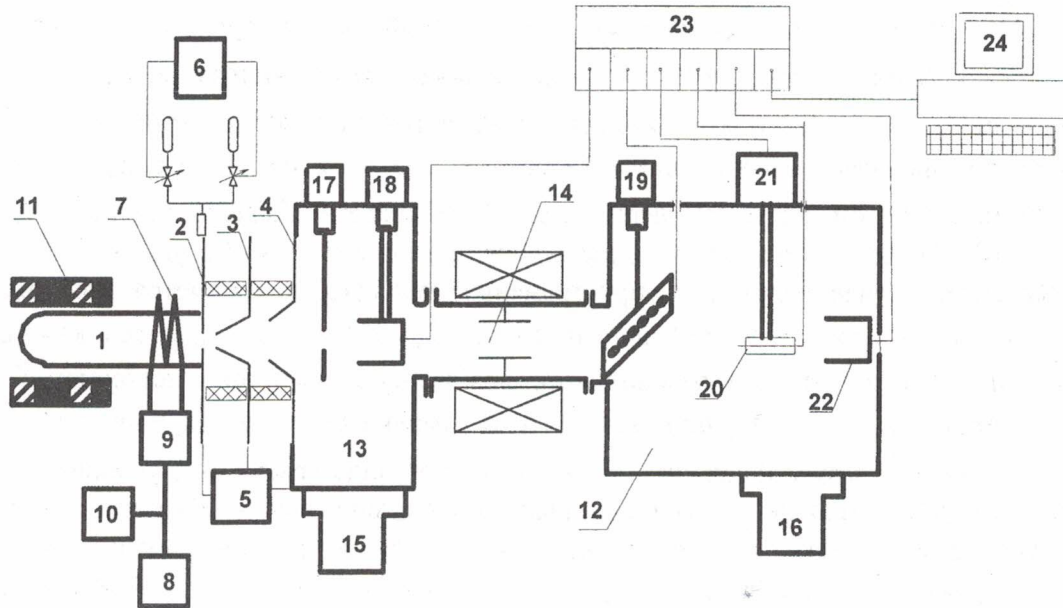


Рис. 1. Блок-схема стенда для испытания источников ионов.

Стенд для испытания источников ионов (рис. 1) состоит из следующих основных узлов и систем:

ВЧ-источника ионов: газоразрядной колбы (1), системы формирования пучка ионов (2 - 4), системы высоковольтного питания (5), системы напуска газа (6);

ВЧ-системы: ВЧ-антенны (7), ВЧ-генератора (8), системы ВЧ-согласования генератора с нагрузкой (9), измерителя ВЧ-мощности (10);

магнитной системы (11);

диагностической камеры (12);

камеры предварительной диагностики пучка (13);

масс-сепаратора – фильтра Вина (14);

вакуумной системы: турбомолекулярного (15) и диффузионного (16) насоса;

системы диагностики пучка: объектной диафрагмы (17), цилиндров Фарадея (18, 22), эмиттансометра (19 - 21), электронного оборудования системы сбора и обработки экспериментальных данных (23, 24).

### Исследование ВЧ-источника ионов с компактной магнитной системой

Одним из перспективных направлений повышения эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму является возбуждение в плазме ВЧ-источника геликонных волн в частотном диапазоне  $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ , где  $\omega_{ca} = eB_0/m_\alpha c$  - циклотронная частота электронов или ионов. Геликонные волны могут поглощаться в плазме за счет столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами [2, 5] или параметрических неустойчивостей [3]. Радиальные компоненты волнового вектора геликона  $k_{rW}$  и электростатических колебаний  $k_{rE}$  определяются известными выражениями [4]:

$$k^2 = k_{rW}^2 + k_{\parallel}^2 = \frac{\omega_{pe}^4 \omega^2}{\omega_{ce}^2 k_{\parallel}^2 c^4}, \quad (\omega_{pe}^2 \gg \omega_{ce}^2 \gg \omega^2),$$

$$k_{rE}^2 = k_{\parallel}^2 \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \frac{1}{\left(1 + \omega_{ce}^2/\omega_{pe}^2\right) \left(1 - \omega_{LH}^2/\omega^2\right)}, \quad (2)$$

где  $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi ne/m_e}$  - ленгмюровская частота электронов;  $\omega_{LH}^2 = \omega_{ce}\omega_{ci}/(1 + \omega_{ce}^2/\omega_{pe}^2)$ ;  $\omega_{LH}$  - частота нижнегибридного резонанса;  $k_{\parallel}$  - продольная составляющая волнового вектора. Проведем оценки возможности возбуждения геликона для следующих параметров ВЧ-источника ионов аргона: эффективная длина ВЧ-разряда  $L_{RF} = 12$  см ( $k_{\parallel} = \pi/L_{RF} = 0,26$  см<sup>-1</sup>), радиус плазмы  $r_p = 1,5$  см, длина ВЧ-антенны  $L_a = 4$  см, частота ВЧ-генератора  $f = 27,12$  МГц ( $\omega = 1,7 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>), постоянное продольное магнитное поле  $B = 40$  Гс ( $\omega_{ce} = 7 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>). В рассматриваемом случае условие распространения геликона выполняется при значениях плотности  $n > 8 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. При меньшей плотности  $k_{rW}^2 < 0$  и амплитуда геликона спадает при удалении от антенны. Для резонансного возбуждения геликона необходимо, чтобы среднее значение  $k_{rW}^2$  было больше некоторого минимального значения, равного  $\alpha/r_p^2$ , где  $r_p = 1,5$  см – радиус плазмы (значение  $\alpha \sim 1$  зависит от вида граничных условий). Следует отметить, что для перехода в геликоновый режим вначале необходимо обеспечить индукционный режим работы источника с плотностью  $n > 1,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> (должно выполняться условие  $r_p > \delta$ , где  $\delta = c/\omega_{pe}$  - глубина скин-слоя). Условие  $k_{rW} \approx k_{rE} \approx \pi/2r_p \approx 1$  выполняется при  $n \sim 3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

Одним из необходимых условий создания эффективного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем является обеспечение в разрядной камере источника необходимой структуры и величины магнитных полей. Величина и протяженность поля определяется режимом работы ВЧ-источника. На магнитные системы (МС), создающие такие поля в ВЧ-источниках ионов, накладываются дополнительные условия: 1) компактность системы; 2) минимальное увеличение эмиссионного нормализованного эмиттанса; 3) оптимальные условия фокусировки пучка в системе экстракции и предварительного ускорения источника ионов.

Для реализации режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> разработана и изготовлена компактная магнитная системы с постоянными магнитами и ферритами кольцевой формы, позволяющая создавать по всей длине ВЧ-антенны магнитное поле  $B_z \sim 30 - 50$  Гс. На рис. 2 приведено распределение расчетного и измеренного продольного магнитных полей на оси системы. Расчеты магнитных полей производились с помощью численного кода Poisson-Superfish (LANL). Измерения величины магнитного поля на оси магнитной системы проводились с помощью датчика Холла. Различие в расчетных и измеренных величин в области размещения ВЧ-антенны не превышает 5 %.

В ВЧ-источнике ионов реализован индуктивный ВЧ-разряд с внешним магнитным полем ( $\sim 40$  Гс) с плотностью аргоновой плазмы  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при 40 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности ( $f_{ВЧ} = 27,12$  МГц). Величина магнитного поля в разрядной камере ВЧ-источника определяется позиционированием магнитной системы относительно ВЧ-антенны. Плотность плазмы оценивалась по формуле для величины эмиссионного тока. Плотность ионного тока внутри вытягивающего электрода источника составляла 10 мА/см<sup>2</sup> при диаметре эмиссионного отверстия 0,6 мм. Измерения тока и профиля тока проводились с помощью установки испытания ионных источников. На рис. 3 представлен профиль тока для данного режима работы источника. По профилю тока пучка при известных размерах объектной диафрагмы 17 (см. рис. 1) произведена оценка половинного угла расхождения пучка. При оптимальном формировании пучка оценочная величина половинного угла расхождения составляла не более 2 мрад, что свидетельствует о достаточно высокой степени параксиальности пучка.



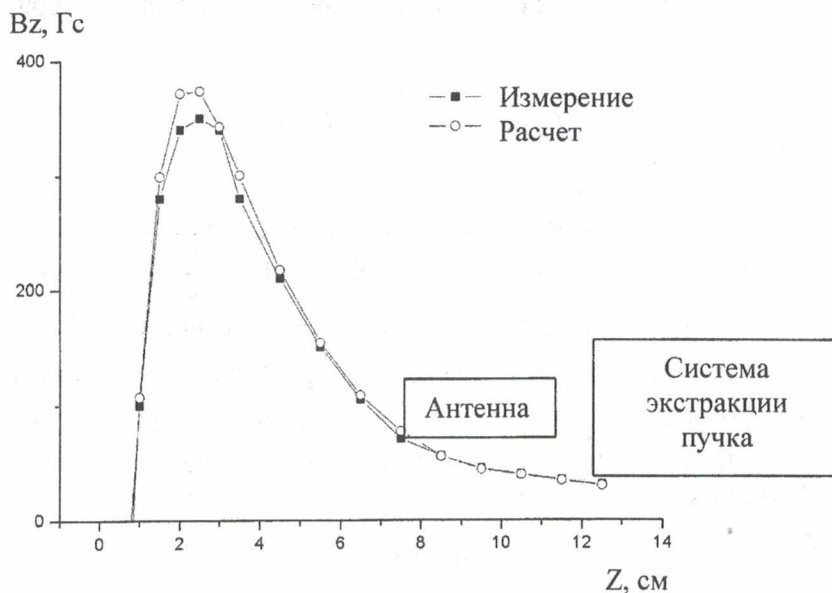


Рис. 2. Распределение продольного магнитного поля для режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Проведем оценки возможности возбуждения геликона для следующих параметров ВЧ-источника ионов аргона: эффективная длина ВЧ-разряда  $L_{RF} = 10 \text{ см}$ , радиус плазмы  $r_p = 1,5 \text{ см}$ , частота ВЧ-генератора  $f = 27,12 \text{ МГц}$  ( $\omega = 1,7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ ), постоянное продольное магнитное поле  $B = 1000 \text{ Гс}$  ( $\omega_{ce} = 1,76 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ). В рассматриваемом случае условие распространения геликона выполняется при значениях плотности  $n > 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Условие  $k_{rW} \approx \pi/2r_p \approx 1$  выполняется при  $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Для реализации режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  разработана и изготовлена компактная магнитная система (длина системы 18,6 см) с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами (600 НН) кольцевой формы, позволяющая создавать в разрядной камере магнитное поле 600 – 1000 Гс. На рис. 4 приведено распределение расчетного продольного магнитного поля на оси системы.

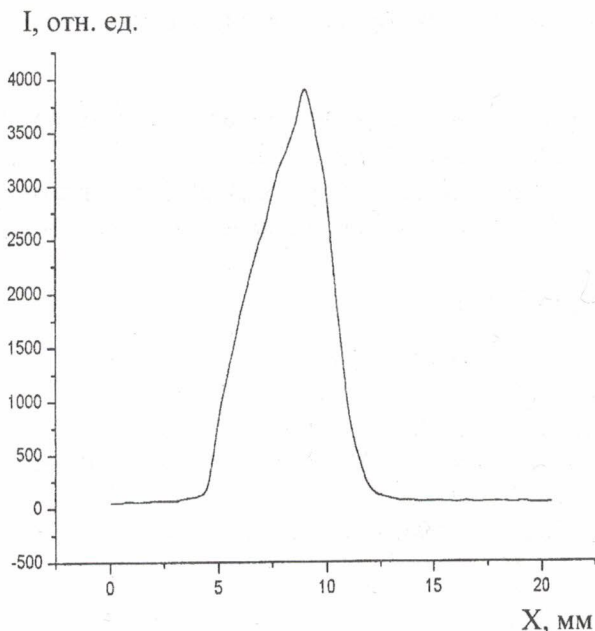


Рис. 3. Профиль ионного тока.

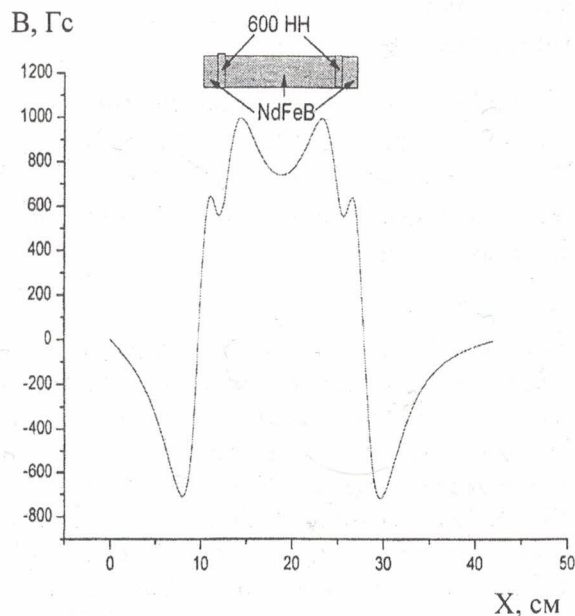


Рис. 4. Распределение продольного магнитного поля для режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Оценим минимальный уровень мощности, требуемый для поддержания ВЧ-разряда [10]

$$P_{rf} = 2\pi^2 \frac{r_p^2}{L} W_e D_a n, \quad (3)$$

где  $W_e$  - энергия, затрачиваемая на образование в плазменном разряде одной электрон-ионной пары, для водорода  $W_e \approx 50$  эВ, для аргона  $W_e \approx 200$  эВ,  $L = L_k/2$ ;  $L_k$  - длина камеры;  $D_a = V_s^2 / 2v_{ch}$  - коэффициент амбиполярной диффузии;  $V_s$  - ионно-звуковая скорость;  $v_{ch} = \sigma_{ch} N V_{Ti}$  - частота;  $\sigma_{ch}$  - сечение перезарядки;  $N$  - плотность атомов. Для ВЧ-источника с параметрами  $L_k = 18$  см,  $r_p = 1,5$  см,  $T_e = 5$  эВ,  $T_i = 0,1$  эВ,  $N = 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> для поддержания плотности аргоновой плазмы на уровне  $n \sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup> необходимо прикладывать ВЧ-мощность  $P_{rf} \sim 500$  Вт.

### Выводы

В ВЧ-источнике ионов реализован индуктивный ВЧ-разряд с внешним магнитным полем ( $\sim 40$  Гс) с плотностью аргоновой плазмы  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при 40 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности ( $f_{ВЧ} = 27,12$  МГц). Плотность ионного тока внутри вытягивающего электрода источника составляла величину  $10$  мА/см<sup>2</sup> при диаметре эмиссионного отверстия  $0,6$  мм. Для реализации режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> разработана и изготовлена компактная магнитная система (длина  $18,6$  см) с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами кольцевой формы. Для реализации режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> разработана и изготовлена компактная магнитная система (длина системы  $18,6$  см) с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами кольцевой формы, позволяющая создавать в разрядной камере магнитное поле  $600 - 1000$  Гс. Проведены оценки возможности возбуждения геликонной моды, а также величины ВЧ-мощности, необходимой для поддержания плотности плазмы на уровне  $3 \cdot 10^{11} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup> в компактных ВЧ-источниках ионов.

Разработан, изготовлен и отлажен экспериментальный стенд, позволяющий производить экспрессные измерения фазовых характеристик, эмиттанса, яркости, полного тока, профиля тока, энергетического разброса и массового состава пучка ионов, извлекаемого из источника ионов.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Украины (проект № 2М71-2001) и ВМБФ (Германия), проект UKR 00/003.

Авторы выражают благодарность К. Н. Степанову, К. П. Шамраю, В. В. Ольшанскому за полезные обсуждения, В. М. Еременко, С. Н. Хоменко за проведенные измерения магнитных полей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boswell R.W., Porteous R. K.* // Appl. Phys. Lett. - 1987. - Vol. 50. - P. 1130.
2. *Chen F. F., Sudit I.D., Light M.* // Plasma Sources Sci. Technol. - 1996. - No. 5. - P. 173.
3. *Akhiezer A. I., Mikhaleiko V. S., Stepanov K. N.* // Phys. Lett. - 1998. - Vol. A 245. - P. 117.
4. *Ginzburg V.L., Ruchadze A.A.* Waves in Magnetoactive Plasma. - М.: Nauka, 1975 (in Russian); Handbuch der Physik. - 1972. - Band 395, No. 49/4 (English Edition).
5. *Shamrai K. P., Taranov V. B.* // Plasma Phys. Control. Fusion. - 1994. - Vol. 36. - P. 1717.
6. *van Steenberg A.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1965. - P. 745.
7. *Child C.D.* // Phys. Rev. - 1911. - Vol. 32. - P. 492.
8. *Langmuir I., Compton K.T.* // Rev. Mod. Phys. - 1931. - Vol. 3.
9. *Swanson J.* // Nucl. Instr. and Meth. - 1983. - Vol. 218. - P. 347.
10. *Chen F. F.* // J. Vac. Sci. Technol. - 1992. - Vol. A 10. - P. 1389.



**МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ГУСТИНИ ПЛАЗМИ ВЧ-ДЖЕРЕЛ ІОНІВ****В. І. Возний, В. І. Мірошниченко, С. М. Мордик, В. Ю. Сторіжко, Б. Сулкіо-Клефф**

Розглянуто можливості підвищення густини плазми у ВЧ-джерелах з метою збільшення яскравості. Підвищення густини плазми здійснюється за рахунок створення ефективного ВЧ-розряду в зовнішньому магнітному полі. Для створення повздовжнього магнітного поля використано компактну магнітну систему з постійними магнітами та феритами кільцевої форми. У джерелі реалізовано ВЧ-розряд із зовнішнім магнітним полем ( $\sim 40$  Гс) з густиною аргонної плазми  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при 40 Вт введеної в плазму ВЧ-потужності ( $f_{\text{ВЧ}} = 27,12$  МГц). Густина іонного струму всередині витягаючого електрода джерела була 10 мА/см<sup>2</sup> при діаметрі емісійного отвору 0,6 мм. Вимірювання струму та його профілю проводились за допомогою стенда іспиту іонних джерел. Стенд дає змогу проводити вимірювання струму, емітанса, масового складу та енергетичного розкиду пучка, а також рівень введеної в плазму ВЧ-потужності.

**POSSIBILITIES TO INCREASE RF ION SOURCE PLASMA DENSITY****V. I. Voznyy, V. I. Miroshnichenko, S. N. Mordik, V. E. Storizhko, B. Sulkio-Cleff**

The possible ways of increasing plasma density in RF ion sources to obtain higher beam brightness are reviewed. Plasma density increase is achieved by initiating an efficient RF discharge in an external magnetic field. Longitudinal magnetic field is generated by a compact magnet system with permanent magnets and ferrites of circular shape. In the source an RF discharge is set up with an external magnetic field of  $\sim 40$  G and argon plasma density of  $3 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-3</sup> for RF power input into the plasma of 40 W ( $f_{\text{RF}} = 27,12$  MHz). The ion current density inside an extracting electrode in the source is 10 mA/cm<sup>2</sup> for an emission hole diameter of 0,6 mm. Measurements of the current value and current profile were performed with ion source testing equipment permitting measurements of the current, emittance, mass composition, ion beam energy spread, and RF power input into the plasma.

Поступила в редакцію 18.02.03,  
после доработки – 19.03.03.