

**В.И. Возный, В.И. Мирошніченко, С.Н. Мордик, А.Г. Нагорный,
Д.А. Нагорный, В.Е. Сторижко, Д.П. Шульга**

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы

ВЫСОКОЯРКОСТНЫЕ ВЧ-ИСТОЧНИКИ ИОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ



Представлены результаты исследований двух типов ВЧ-источников ионов: геликонового и мультикаспового с компактными системами постоянных магнитов. Получены следующие параметры источников: плотность плазмы 10^{11} – 9×10^{12} см⁻³, плотность ионного тока — 10–130 мА/см², яркость — ~ 100 А · м⁻² · рад⁻² · эВ⁻¹, энергетический разброс — 8–30 эВ при ВЧ-мощности 40–400 Вт, вводимой в плазму, и рабочем давлении в разрядной камере 2–10 мТорр.

Ключевые слова: геликонный источник ионов, мультикасповый источник ионов, сфокусированный ионный пучок, яркость.

Источник ионов электростатического ускорителя (ЭСУ) должен обеспечивать следующие основные параметры: высокую яркость однородного и контролируемого по составу ионов в пучке; малый энергетический разброс; большой срок службы — не менее 1000 часов; экономичный режим работы (источник должен работать с минимально возможным количеством рабочего вещества и 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 ЭСУ. Данный тип источника ионов имеет целый ряд достоинств: срок службы более 1000 часов, стабильность ионно-оптических параметров, высокую степень ионизации газа, компактность, достаточно большой ионный ток (1–100 мкА) и высокую яркость ($B_n \sim 1$ – 100 А · м⁻² · рад⁻² · эВ⁻¹).

В данной работе представлены результаты исследований двух типов ионных ВЧ-источников, разработанных в Институте прикладной физики (ИПФ) НАН Украины — геликонный источник ионов и мультикасповый высокочастотный источник ионов. Оба источника используют внешнее магнитное поле, однако роль магнитного поля и механизм поглощения плазмой ВЧ-энергии в этих источниках существенно отличаются. В геликонном источнике внешнее магнитное поле способствует возбуждению в плазме электромагнитных геликонных волн и волн Трайвелписа—Гулда, энергия которых может проникать вглубь плазмы и поглощаться во всем плазменном объеме. В мультикасповом источнике плазма образуется внутренней ВЧ-антенной в результате индуктивного ВЧ-разряда, и глубина проникновения ВЧ-поля ограничена глубиной скин-слоя. Внешнее мультикасповое магнитное поле служит для удержания плазмы и ее изоляции от стенок разрядной камеры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ИПФ НАН Украины разработана, изготовлена и отлажена установка, позволяющая

© В.И. ВОЗНЫЙ, В.И. МИРОШНИЧЕНКО, С.Н. МОРДИК, А.Г. НАГОРНЫЙ, Д.А. НАГОРНЫЙ, В.Е. СТОРИЖКО, Д.П. ШУЛЬГА, 2010

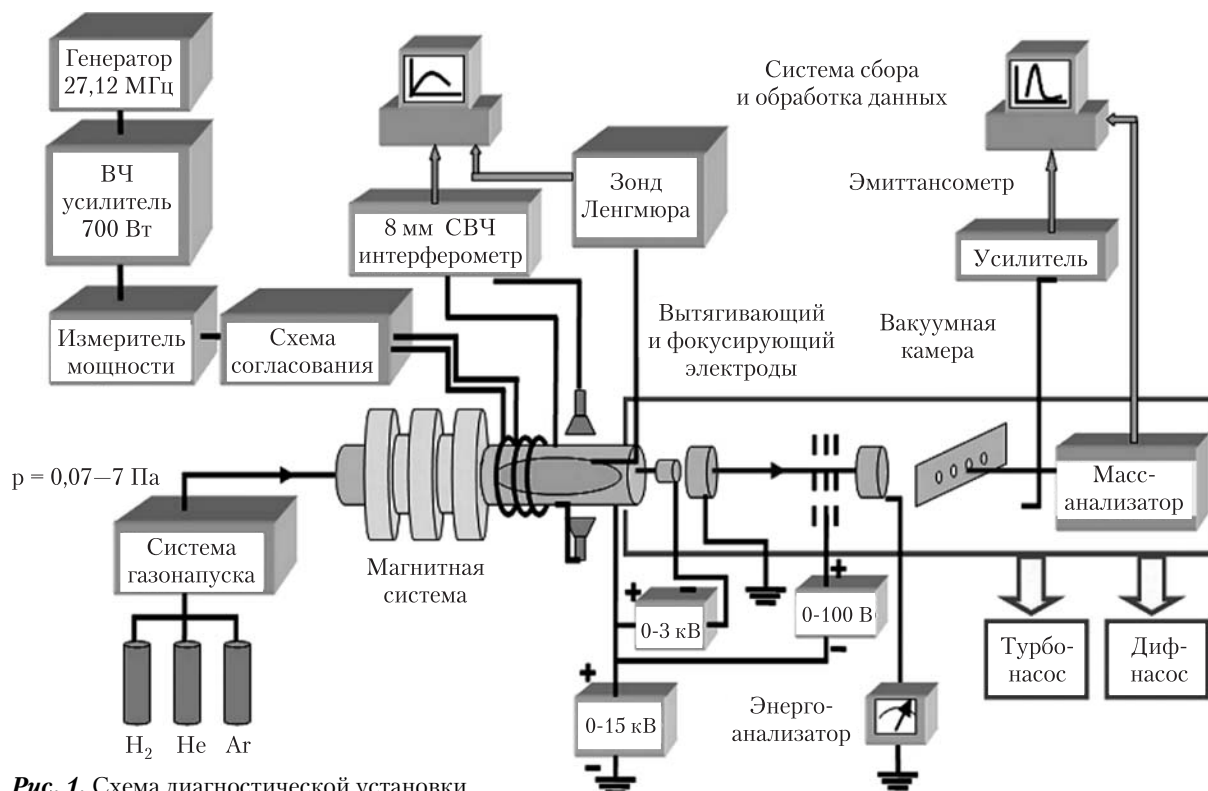


Рис. 1. Схема диагностической установки

производить экспрессные измерения фазовых характеристик, эмиттанса, яркости, полного тока, профиля тока, энергетического разброса и массового состава пучка ионов, извлекаемого из источника ионов, а также плазменных параметров ВЧ-источника: плотности плазмы и температуры электронов [1]. Данная установка позволяет производить испытание источников ионов, используемых в микрозондах, имплантерах, литографах, ускорителях ионов, в частности решать задачу выбора высокояркостных режимов работы ВЧ-источника ионов. Результаты этих исследований дают возможность определить перспективные направления модернизации ВЧ-источников ионов, используемых для получения высокоэнергетических ионных микропучков. Схема экспериментальной установки для тестирования ионных ВЧ-источников показана на рис. 1.

Измерения средней плотности плазмы ВЧ-источников проводились с помощью 8 мм

СВЧ-интерферометра, разработанного в ИПФ НАНУ [2]. В интерферометре применяется гомодинное преобразование частоты СВЧ-генератора в результате ее модуляции пилообразным напряжением. Интерферометр построен по схеме Маха—Цендера, в которой плазма находится в одном из двух плеч двухлучевого интерферометра. СВЧ-сигнал разделяется на две части, одна из которых поступает через опорный канал на детектор, а другая посредством передающей и приемной рупорных антенн проходит через плазму. Минимальный измеряемый фазовый сдвиг $1,5^\circ$ соответствует плотности плазмы $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, сдвиг 360° — плотности плазмы $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Погрешность измерения фазового сдвига не превышает 5%.

Измерения эмиттанса ионного пучка выполнялись с использованием пластины с набором отверстий и подвижного вертикального проволочного зонда. Пластина с отверстиями

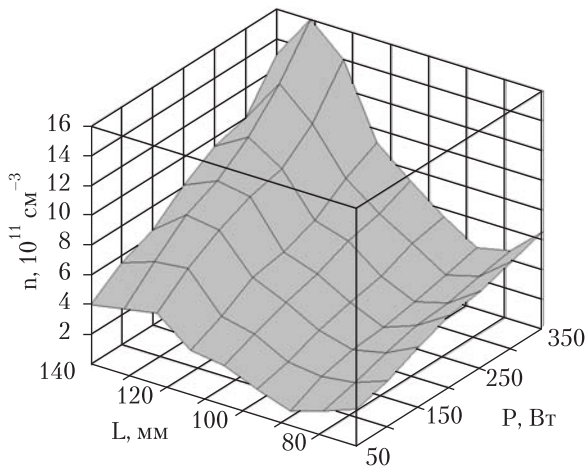


Рис. 2. Зависимость плотности He-плазмы от ВЧ-мощности и положения магнитов (МАЭ-режим, L – расстояние между магнитом и экстрактором, $p = 10$ мТорр)

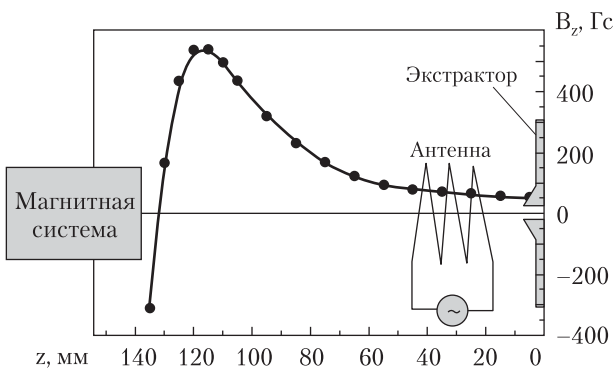


Рис. 3. Распределение величины продольного магнитного поля вдоль оси источника

может выводиться из зоны измерений, что позволяет проводить измерения профиля и полного тока пучка, измеряемого с помощью цилиндра Фарадея. Измерения массового состава пучка проводились с помощью фильтра Вина. Разрешающая способность фильтра равна $M_i/\Delta M = 100$. Данный прибор является классическим фильтром Вина с параллельными полюсами электромагнита. Расстояние между полюсами магнита равно 8 мм, между пластинами конденсатора – 3 мм. Эффективная длина фильтра Вина – 100 мм.

ГЕЛИКОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ

Основное направление усовершенствования ядерного микронзонда – повышение яркости источника ионов. Одним из перспективных направлений повышения яркости ВЧ-источника является повышение плотности плазмы за счет передачи энергии внешнего ВЧ-генератора электронам плазмы в геликонном диапазоне частот. Интерес к геликонным разрядам вызван их высокой степенью ионизации: плотность плазмы достигает величины на порядок выше плотности плазмы других источников при том же давлении и уровне ВЧ-мощности [3–6]. В данной работе рассмотрены два типа ВЧ-источников ионов, работающих в геликонном частотном диапазоне волн $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$, где ω_{ce} , ω_{ci} – циклотронная частота электронов и ионов, ω – рабочая частота генератора. Оба источника работают в режимах средних токов (1–350 мкА) с плотностью эмиссионного ионного тока 1–130 мА/см², при этом вводимая в плазму мощность не превышает 400 Вт. Система экстракции источников имеет следующие размеры: длина канала катода – 3 мм, диаметр канала – 0,6 мм. Разрядные колбы изготовлены из кварца и имеет наружный диаметр 30 мм и длину 200 мм. Длина колбы увеличена для возможности реализации геликонного разряда во внешнем магнитном поле. Высокочастотная система, которая состоит из задающего генератора частотой 27,12 МГц, усилителя мощности «Асом-1000» и согласующего устройства, обеспечивает регулируемую выходную мощность до 400 Вт в непрерывном режиме. Основным отличием источников является использование различных магнитных систем, а также взаимное расположение основных элементов источника (антенна, магнит, экстрактор – АМЭ-режим; магнит, антенна, экстрактор – МАЭ-режим). В источниках использовались как винтовая антенна, так и антенна типа Nagoya III. Конструкция магнитной системы определялась следующими условиями: 1) величина и структура магнитного поля должна способствовать

ефективному поглиноенню ВЧ-мощности в плазме; 2) быть компактной; 3) производить минимальное увеличение эмиссионного нормализованного эмиттанта.

С целью выяснения степени корреляции между плотностью плазмы и плотностью тока пучка были проведены измерения данных величин для геликонного источника с расположением элементов конструкции, изображенным на рис. 1 (МАЭ-режим). На рис. 2 представлена зависимость средней плотности гелиевой плазмы возле эмиссионного отверстия от подводимой к плазме ВЧ-мощности и положения магнитов относительно системы экстракции (L — расстояние между краем магнита и эмиссионным отверстием системы экстракции) для рабочего давления в разрядной камере 10 мТорр. Измерения плотности плазмы для аргона и водорода при таких же условиях показали, что наблюдается подобный характер зависимости величины плотности плазмы от подводимой ВЧ-мощности и положения магнитов.

Как видно из рисунка, имеется положение магнитной системы, при котором происходит наиболее эффективное поглотение мощности в плазме. Распределение величины продольного магнитного поля показано на рис. 3. Эффективность поглотения мощности в геликонном разряде зависит от ряда параметров: величины и структуры магнитного поля, рабочего давления, сорта газа, частоты генератора, эффективной длины разряда, геометрических размеров разрядной камеры и антенны. При рабочем давлении газа в источнике ~ 10 мТорр и подводимой ВЧ-мощности 350 Вт измеренная плотность плазмы вблизи эмиссионного отверстия составила величины: $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (Ar), $1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (He) и $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (H_2). Средняя плотность плазмы между антенной и магнитом равна: $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (Ar), $2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (He) и $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (H_2).

На рис. 4 представлена зависимость величины ионного тока насыщения пучка ионов гелия и плотности плазмы вблизи эмиссионного отверстия от мощности, подводимой к плазме геликон-

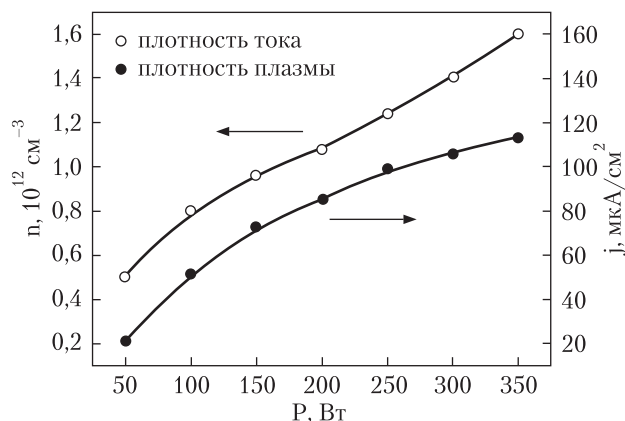


Рис. 4. Зависимость плотности плазмы и плотности тока насыщения пучка ионов гелия от ВЧ-мощности ($L = 130$ мм, $p = 10$ мТорр)

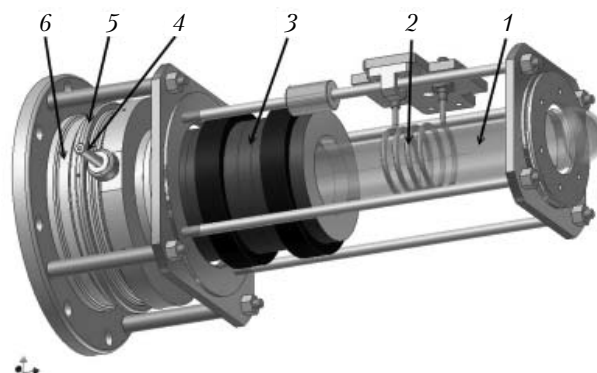


Рис. 5. Внешний вид геликонного источника ионов (АМЭ-режим): 1 — газоразрядная камера, 2 — винтовая антенна, 3 — магнитная система, 4 — отверстие для напуска газа, 5, 6 — система электродов

ного источника для оптимального положения магнитной системы. Как видно из рисунка, имеется хорошая корреляция между измеренной плотностью плазмы и плотностью тока насыщения для плотностей гелиевой плазмы $< 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При повышении плотности плазмы происходит изменение свойств плазменной границы и, как следствие, изменение ионно-оптических характеристик пучка. При увеличении плотности плазмы возникает необходимость повышения вытягивающего напряжения, а также обеспечения дополнительной фокусировки пучка в системе экстракции для минимизации потерь пучка.

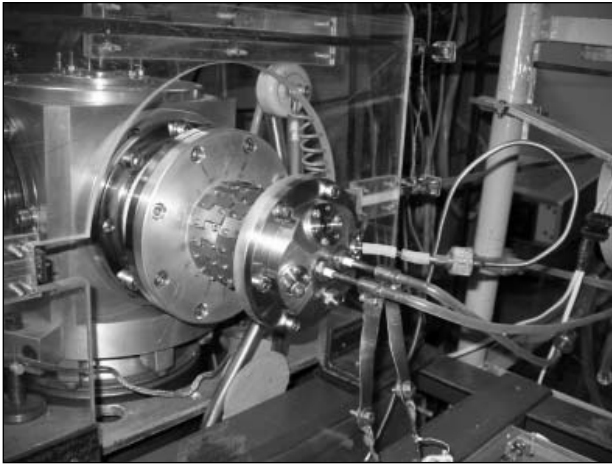


Рис. 6. Внешний вид мультикаспового ВЧ-источника ионов

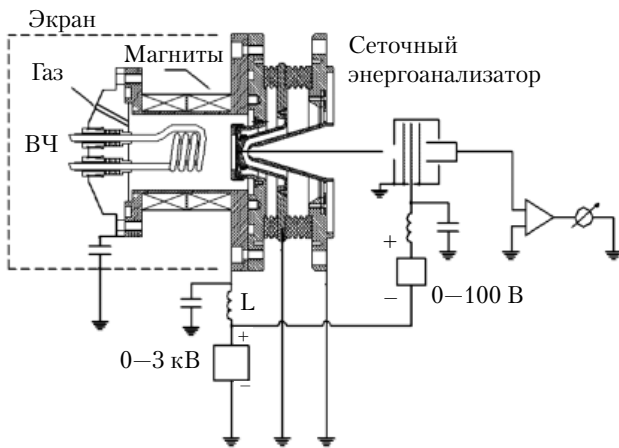


Рис. 7. Схема МКИИ и сеточного энергоанализатора

В высокоярком источнике ионов гелия и водорода, работающем в АМЭ-режиме [7–9], магнитное поле вместе с высокочастотным полем, создаваемым индуктором, обеспечивает в плазме резонансные условия для возбуждения и эффективного поглощения волн в геликонном диапазоне частот (рис. 5). При обеспечении резонансных условий максимум энерговклада перемещается в центр разрядной камеры, что способствует более эффективной ионизации и повышению плотности плазмы. В области системы постоянных магнитов обеспечивается удержание и перенос плазмы в область

системы экстракции. В области эмиссионного отверстия происходит сжатие полученной плазмы, в результате чего повышается плотность тока извлекаемого пучка. В АМЭ-режиме получены яркости пучка ионов гелия и водорода на уровне $100 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ при рабочем давлении газа в источнике ~ 10 мТорр и подводимой к плазме ВЧ-мощности ~ 150 Вт.

МУЛЬТИКАСПОВЫЙ ВЧ-ИСТОЧНИК ИОНОВ

Мультикасповый ВЧ-источник ионов (МКИИ) разработан с целью снижения энергетического разброса пучка на входе в ускорительную структуру ЭСУ. Внешний вид и схема МКИИ представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Источник состоит из цилиндрической дюралюминиевой разрядной камеры с внутренним диаметром 47 мм и длиной 80 мм. Внешняя поверхность камеры окружена рядом постоянных магнитов Nd-Fe-B, которые установлены с чередующейся полярностью, создавая мультикасповую конфигурацию магнитного поля. Количество магнитов в ряду – 18, их размеры – $6 \times 10 \times 30$ мм. Магнитное поле достигает максимального значения ~ 300 мТл возле стенки разрядной камеры и спадает экспоненциально к центру. В центре источника в области слабого магнитного поля располагается ВЧ-антенна. Антенна выполнена из гибкого многожильного витого медного провода, пропущенного внутри стеклянной («Duran») трубки. Стеклянная трубка с наружным диаметром 6 мм согнута в форме спирали с тремя витками и с внешним диаметром 25 мм. Для охлаждения ВЧ-антенны применяется система водоохлаждения, представляющая собой замкнутый контур, по которому прокачивается дистиллированная вода. Фланец мультикаспового источника изготовлен из нержавеющей стали и содержит вакуумный ввод ВЧ-антенны и подвод рабочего газа. Стеклянное окно, имеющееся на фланце, служит для наблюдения за разрядом. Вытягивающий электрод (катод) изготовлен из молибдена и имеет канал экстракции диаметром 0,6 мм и длиной 3 мм.

С помощью сеточного энергоанализатора методом задерживающего потенциала измерены функции распределения ионов по энергии (ФРИЭ) гелиевого пучка. По ширине ФРИЭ на ее полувысоте определен энергетический разброс ΔE гелиевого пучка. Установлено, что $\Delta E = 8 \pm 1$ эВ при ВЧ-мощности 100–200 Вт. Энергетический разброс увеличивается с ростом ВЧ-мощности и не зависит от давления газа в разрядной камере ионного источника. Двухпиковая структура ФРИЭ при низких давлениях свидетельствует о наличии паразитной емкостной связи ВЧ-разряда. Такая структура характерна для ФРИЭ, которая формируется в слое объемного заряда с временной ВЧ-модуляцией потенциала слоя. В мультикасповом варианте реализованы режимы с током ионов гелия 100 мкА и яркостью пучка $20 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ при величине ВЧ-мощности 200 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы компактные генераторы плазмы с высокой плотностью плазмы $5 \cdot 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для использования в ионно-пучковых технологиях. Измерения плотности плазмы производились с помощью СВЧ-интерферометра. Получены яркости пучка на уровне $100 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Дальнейшее повышение яркости требует проведения комплексных исследований геликонных генераторов и систем экстракции источников ионов.

Создана диагностическая установка для измерения как плазменных параметров ВЧ-источников ионов, так и фазовых, энергетических и массовых характеристик экстрагированных ионных пучков.

Для получения ионных пучков с малым энергетическим разбросом разработан мультикасповый ВЧ-источник ионов на частоте 27,12 МГц. Минимальный энергетический разброс ионов гелия равен $\Delta E = 8 \pm 1$ эВ при 200 Вт ВЧ-мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Возный В.И., Мирошниченко В.И., Мордик С.Н. и др.* Экспериментальная установка для тестирования ВЧ-источников ионов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения» (3). — 2003. — № 4. — С. 284–287.
2. *Нагорный Д.А., Нагорный А.Г., Возный В.И.* Сверхвысокочастотный интерферометр для измерения плотности стационарной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 2. — С. 98–100.
3. *Boswell R.W., Porteous R.K.* Large volume, high density rf inductively coupled plasma // Appl. Phys. Lett. — 1987. — Vol.50. — P. 1130.
4. *Chen F.F., Sudit I.D., Light M.* Helicon waves in a non-uniform plasma // Plasma Sources Sci. Technol. — 1996. — No. 5. — P. 173.
5. *Shamrai K.P. and Taranov V.B.* Resonance wave discharge and collision energy absorption in helicon plasma source // Plasma Phys. Control. Fusion. — 1994. — Vol. 36. — № 11. — P. 1719–1735.
6. *Miroshnichenko V.I., Mordyk S.M., Olshansky V.V. et al.* Possibilities to increase rf ion source brightness for nuclear microprobe applications // Nucl. Instrum. Meth. B. — 2003. — V201. — P. 630–636.
7. *Mordyk S., Voznyy V., Miroshnichenko V., Storizhko V.* Patent of Ukraine UA 67392, H 01J 27/16, 2003098400 (15.06.2004 BulletinN6).
8. *Miroshnichenko V.I., Mordyk S.M., Storizhko V.E. et al.* Sulkio-Cleff B. and Voznyy V.I. Development of a dedicated ion injector for accelerator-based nanoprobe facilities // Vacuum. — 2004. — Vol. 75. — № 2. — P. 237–242.
9. *Miroshnichenko V.I., Mordyk S.M., Storizhko V.E. et al.* High brightness rf ion source for accelerator-based microprobe facilities // Rev. Sci. Instrum. — 2004. — Vol. 75. — № 5. — P. 1922–1924.

В.І. Возний, В.І. Мирошніченко,
С.М. Мордик, О.Г. Нагорний, Д.О. Нагорний,
В.Ю. Сторіжко, Д.П. Шульга

ВИСОКОЯСКРАВИСНІ ВЧ-ДЖЕРЕЛА ІОНІВ
ДЛЯ ПРИСКОРЮВАЛЬНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Наведені результати досліджень двох типів ВЧ-джерел іонів: геліконного та мультикаспового з компактними системами постійних магнітів. Отримано такі параметри джерел: густина плазми — 10^{11} – $9 \cdot 10^{12}$ см⁻³, густина іонного струму — 10–130 мА/см², яскравість — ~ 100 А · м⁻² · рад⁻² · еВ⁻¹, енергетичний розкид 8–30 еВ при ВЧ-потужності 40–400 Вт, що вводиться у плазму, і робочому тиску в розрядній камері 2–10 мТорр.

Ключові слова: геліконне джерело іонів, мультикаспове джерело іонів, фокусований пучок іонів, яскравість.

V. Voznyy, V. Miroschnichenko,
S. Mordyk, A. Nahorny, D. Nahorny,
V. Storizhko, D. Shulha

HIGH-BRIGHTNESS RF ION SOURCES
FOR ACCELERATOR APPLICATIONS

The results of investigations of two types of radio-frequency ion sources: helicon and multicusp versions with compact magnet systems are presented. The following parameters of the sources were obtained: plasma density of 10^{11} – $9 \cdot 10^{12}$ cm⁻³, beam current densities of 10–130 mA/cm², brightness ~ 100 A · m⁻² · rad⁻² · eV⁻¹, energy spread 8–30 eV, RF power input into the plasma of 40–400 W and pressure of 2–10 mTorr.

Key words: helicon ion source, multicusp ion source, focused ion beam, brightness.

Надійшла до редакції 18.06.10