

## Формирование сильноточного пучка многозарядных ионов из плотной плазмы, создаваемой мощным миллиметровым излучением гиротрона в условиях электронного циклотронного резонанса

© А.В. Сидоров, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, С.В. Разин, В.А. Скалыга

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: alexsv@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 11 марта 2010 г.)

Приведены результаты экспериментов по формированию интенсивных пучков многозарядных ионов тяжелых газов, извлекаемых из плотной плазмы электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда с квазигазодинамическим режимом удержания, создаваемого в магнитной ловушке мощным СВЧ-излучением гиротрона. Использование осесимметричной магнитной ловушки обеспечило получение однородных по поперечным координатам потоков плазмы из ловушки, а применение многоапертурной схемы экстракции позволило более чем на порядок, по сравнению с существующими ЭЦР-источниками, увеличить ток пучка. Получены пучки многозарядных ионов азота с током 150 мА при нормализованном эмиттансе  $0.9\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ .

Настоящая работа является продолжением исследований, направленных на поиск путей формирования пучков многозарядных ионов тяжелых газов с большим током из электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) источника с высокой плотностью плазмы, создаваемого на основе открытой магнитной ловушки с нагревом плазмы миллиметровым излучением гиротрона [1]. В работе [2] были описаны экспериментальные исследования, в результате которых получен импульсный (характерная длительность импульса 1 мс) плазменный поток с плотностью тока через магнитную пробку ловушки более  $1 \text{ A/cm}^2$  из ЭЦР-источника, работающего в режиме квазигазодинамического удержания плазмы с накачкой мощным миллиметровым СВЧ-излучением. Концентрация электронов была близка к  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , температура — на уровне 50–100 эВ, время жизни ионов составило  $\sim 10 \mu\text{s}$ .

Образуясь внутри ловушки, плазма разлеталась вдоль силовых линий магнитного поля за пробку ловушки в камеру расширения. В зоне разлета плазмы плотность плазменного потока падает от максимального значения в пробке до близкого к нулю — в области низкого магнитного поля. Это позволяет варьировать ток ионов через экстрагирующее отверстие в широких пределах путем помещения его в плазму с различной плотностью и, таким образом, дает дополнительные возможности для оптимизации системы формирования ионного пучка. Зависимость плотности тока ионов на оси системы от расстояния до магнитной пробки ловушки была получена в [2].

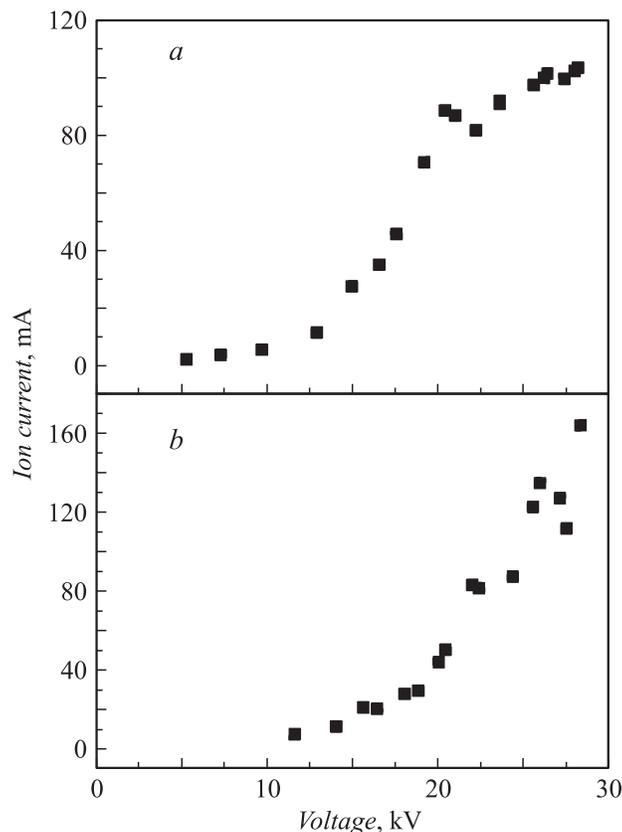
Область плотностей токов, используемая в данной работе, составляла от 100 до  $1000 \text{ mA/cm}^2$ . Рабочим газом служил азот. Во всех экспериментах условия ЭЦР-разряда подбирались таким образом, чтобы распределение ионов по зарядовым состояниям было одинаковым:

основным ионом являлся двухзарядный азот, ионов  $\text{N}^{3+}$  было в 6–7 раз меньше, отношение  $\text{N}^{2+}/\text{N}^{+}$  равнялось примерно двум.

Как известно, абберации и конечная электропрочность системы экстракции ограничивают оптимальный первичный ионный пучок. Поэтому для формирования сильноточных пучков обычно используются многоапертурные системы экстракции. Это в свою очередь налагает определенные условия на источник ионов: необходима высокая степень однородности плотности потока плазмы на экстракторе, а также малое значение напряженности магнитного поля в зоне экстракции. „Классические“ ЭЦР-источники (см., например, [3]) этим требованиям не удовлетворяют, поэтому в них многоапертурные системы не применяются. В газодинамическом ЭЦР-источнике [4] препятствий к использованию многоапертурной системы экстракции нет; например, степень неоднородности потока плазмы по поперечным координатам в газодинамическом ЭЦР-источнике на расстоянии 20 см от пробки ловушки не превышала 10% при ширине потока в 2.5 см [5], этого достаточно для эффективного использования многоапертурного экстрактора. На основе проведенных исследований была сконструирована 13-апертурная система экстракции с диаметрами отверстий по 3 мм в плазменном электроде и пуллере. Расстояние между электродами могло варьироваться.

На рис. 1 представлены зависимости токов ионного пучка на пуллер и цилиндр Фарадея (расположенный сразу за срезом пуллера) от ускоряющего напряжения для случаев, когда экстрактор располагался на расстоянии 22 и 21 см от магнитной пробки соответственно. Зазор между электродами при этом составлял 9 мм. Максимальные значения токов на цилиндр Фарадея составляли 110 и 150 мА соответственно.

Эмиттанс полученного пучка измерялся с помощью метода „perpet-pot“ [6], впервые опробованного на дан-



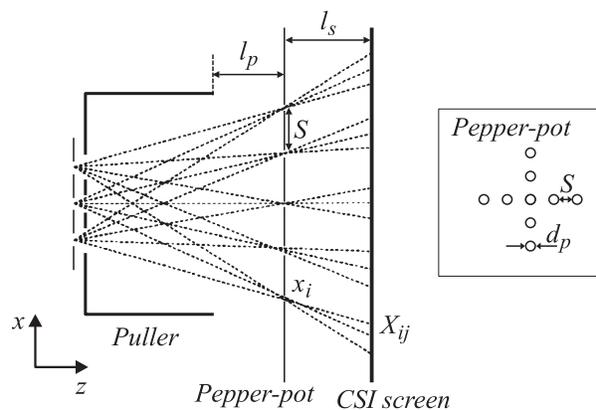
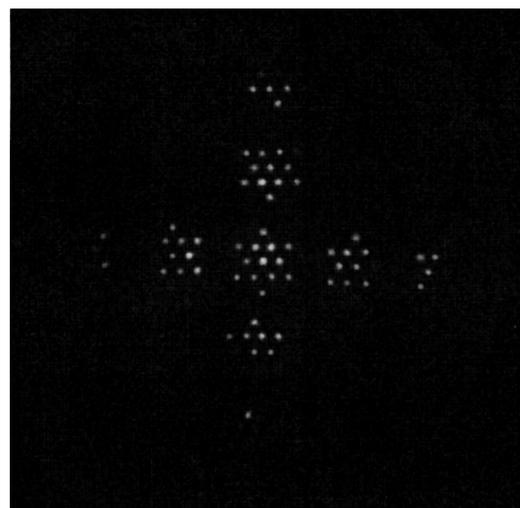
**Рис. 1.** Зависимость тока на цилиндр Фарадея от напряжения для 21 (b) и 22 см (a) от магнитной пробки ловушки.

ной установке в работе [7]. Пластина „pepper-pot“ располагалась непосредственно за срезом пуллера (на расстоянии  $\sim 1$  mm от экстрактора). На расстоянии 55 mm от нее был установлен сцинтилляционный экран из CsI. Фотография свечения сцинтиллятора для случая, когда экстрактор устанавливался в 21 cm от магнитной пробки (см. рис. 1) при напряжении экстракции 30 kV, представлена на рис. 2. Здесь каждая из 9 групп пятен соответствует отверстиям в пластине „pepper-pot“, а отдельные пятна в группах — тринадцати отверстиям в плазменном электроде экстрактора. Схематично принцип формирования изображения представлен на рис. 2.

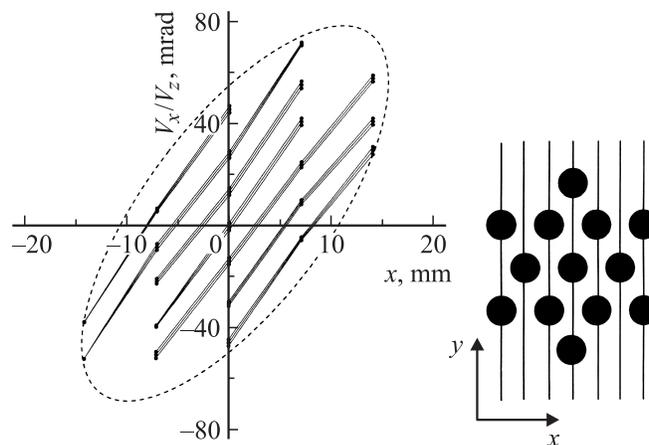
Уже из характера изображения свечения (хорошего разрешения изображения каждого пучка, отсутствия „перемешивания“ трасс пучков, отсутствия искажений формы свечения эмитирующей поверхности) можно сделать вывод, что эмиттанс каждого из 13 пучков невелик.

На рис. 3 представлена восстановленная с помощью фотографии свечения диаграмма эмиттанса в одной из поперечных фазовых плоскостей ( $V_x/V_z; x$ ) для 30 kV ускоряющего напряжения. Каждая из семи областей на диаграмме соответствует одному или нескольким отверстиям (центры которых лежат на одной прямой по координате  $x$ , см. рис. 3) в плазменном электроде. Площадь каждой области („элементарного эллипса“) составляет около  $10 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ , поэтому эффективный эмиттанс [8], соответствующий площади фигуры, охватывающей все семь областей, определяется только вза-

имным расположением отверстий на плазменном электроде и составляет  $450 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$  или  $0.9 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$  в нормализованных единицах.



**Рис. 2.** Фотография свечения пластины CsI для пучка ионов с энергией 30 keV (сверху). Схема эксперимента по измерению эмиттанса (снизу).  $l_p = 1$  mm,  $l_s = 55$  mm,  $S = 7$  mm,  $d_p = 0.3$  mm.



**Рис. 3.** Схема расположения отверстий в плазменном электроде экстрактора и диаграмма эмиттанса ионного пучка.

Таким образом, получен пучок ионов азота со средним зарядом  $\langle Z \rangle = 2$ , током 150 мА и нормализованным эмиттансом менее  $1\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ .

Столь интенсивные пучки многозарядных ионов могут найти применение как в технологических приложениях, так и в фундаментальных исследованиях.

Выполненная работа поддержана грантом РФФИ № 08-02-00531-а и частично — грантом президента РФ для молодых кандидатов наук (В.А. Скалыга) № МК-4866.2008.2.

## Список литературы

- [1] Golubev S.V., Razin S.V., Sidorov A.V., Skalyga V.A., Vodopyanov A.V., Zorin V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. N 5. P. 1675–1677.
- [2] Golubev S., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2005. Vol. 47. N 1T. P. 345–347.
- [3] Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. Bristol: Institute of Physics, 1996. 434 p.
- [4] Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bokhanov A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. Vol. 15. N 4. P. 727–734.
- [5] Sidorov A., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Zorin V., Balabaev A., Kondrashev S., Bokhanov A. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. N 3. P. 03A341-1–03A341-4.
- [6] Applied Charged Particle Optics / Ed. by A. Septier. NY: Academic Press, 1980. P. 214.
- [7] Sidorov A., Dorf M., Bokhanov A., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Zorin V., Balabaev A., Spädike P., Roßbach J. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. N 2. P. 02A317-1–02A317-4.
- [8] *The Physics and Technology of Ion Sources* / Ed. by I. Brown. NY: John Wiley & Sons Inc., 2004. P. 83.