

## Применение плотной плазмы электронного циклотронного резонансного разряда, поддерживаемой излучением гиротрона, для генерации сильноточных пучков многозарядных ионов

© В.А. Скалыга, С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, А.В. Поляков, С.В. Разин, Д.М. Смагин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия  
E-mail: skalyga@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 3 мая 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Результатом исследований в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН стала разработка источника многозарядных ионов с нагревом плазмы высокой плотности в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) — газодинамического ЭЦР-источника многозарядных ионов. В таком источнике из-за высокой частоты столкновения электронов реализуется уже не бесстолкновительный механизм удержания в магнитной ловушке, характерный для традиционных ЭЦР-источников многозарядных ионов, а так называемый квазигазодинамический. Приводятся результаты первых исследований эффективности генерации многозарядных ионов в ЭЦР-разряде с квазигазодинамическим удержанием плазмы в непрерывном режиме его горения.

**Ключевые слова:** сильноточный ионный источник, электронный циклотронный резонанс, магнитное удержание плазмы, многозарядные ионы, гиротрон.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59439.6573k

Развитие исследований в области физики тяжелых ионов и синтеза сверхтяжелых элементов, совершенствование методов и технологий ускорения пучков заряженных частиц, новые горизонты ядерной и квантовой физики непрерывно ставят амбициозные задачи в сфере разработки ионных источников с ранее недоступными характеристиками. Среди наиболее ярких актуальных проектов можно отметить такие, как Фабрика сверхтяжелых элементов (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) в России и Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) в Китае. В зависимости от конкретного эксперимента требуется генерация пучков многозарядных ионов (МЗИ) вплоть до урана с зарядом до +40 и током до 1 мА. Существующие сегодня источники МЗИ не в состоянии удовлетворить всем требованиям.

Одним из наиболее перспективных типов инжекторов пучков многозарядных ионов являются системы на основе плазмы электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда, удерживаемой в открытых магнитных ловушках, или ЭЦР-источники МЗИ. Основным направлением развития данного типа источников являлось повышение частоты и мощности излучения, используемого для нагрева плазмы [1]. На данный момент самые мощные традиционные ЭЦР-источники МЗИ, построенные на основе ловушек с так называемой конфигурацией „минимум-В“, используют излучение гиротронов с частотой 28 GHz и мощностью до 10 kW. В Институте современной физики Китайской академии наук (IMP CAS) в настоящее время создается источник по классической схеме с рекордной частотой нагрева плазмы 45 GHz и мощностью до 20 kW [2]. Но даже эта флагманская

система не сможет удовлетворить всем требованиям современных ускорительных проектов. В связи с этим важным и актуальным является исследование новых возможностей получения сильноточных пучков ионов с предельно высоким зарядом.

Один из перспективных подходов к созданию (совершенствованию) требуемых источников МЗИ связан с применением сильноточного квазигазодинамического источника многозарядных ионов [3] с последующей дополнительной ионизацией ионов в стрипперах. Сильноточный источник МЗИ с квазигазодинамическим режимом удержания был разработан в ИПФ РАН с использованием для поддержания плазмы мощного микроволнового излучения гиротронов с частотой до 75 GHz. Применение мощного коротковолнового излучения гиротронов позволило получать плазму с плотностью до  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , что и обеспечило переход к квазигазодинамическому режиму удержания плазмы с малым временем жизни (несколько десятков микросекунд), и соответственно получать потоки плазмы с эквивалентной плотностью до  $10 \text{ A/cm}^2$ . Была продемонстрирована возможность использования такого режима для получения ионных пучков с высоким током и низким эмиттансом [4]. Так, в импульсном режиме работы источника выполненные к настоящему времени эксперименты продемонстрировали возможность получения пучков многозарядных ионов азота с суммарным током более 150 мА и нормализованным эмиттансом  $0.9 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  [4], получены пучки ионов водорода с током 450 мА и дейтерия с током 400 мА, эмиттанс в обоих случаях составил величину  $0.07 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  [5].

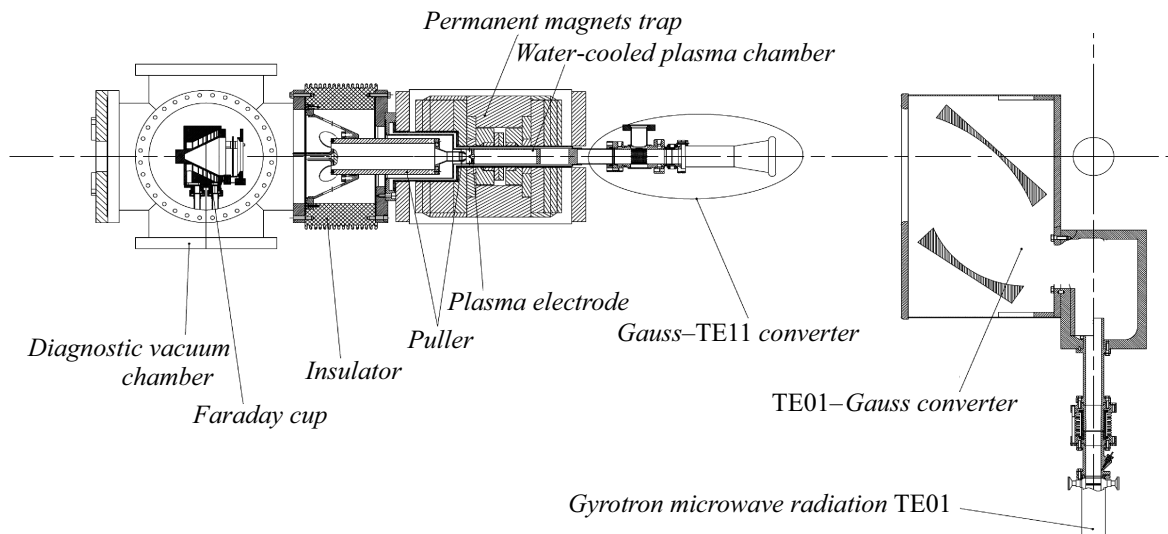


Рис. 1. Схема экспериментальной установки GISMO (источник СВЧ-излучения не показан).

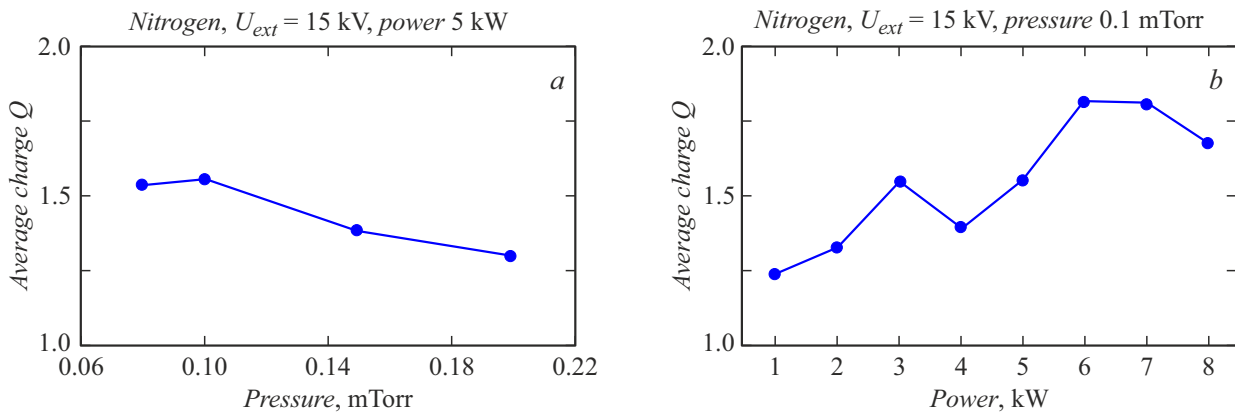


Рис. 2. Зависимости среднего заряда ионов азота от давления в разряде (a) и мощности СВЧ-нагрева (b).

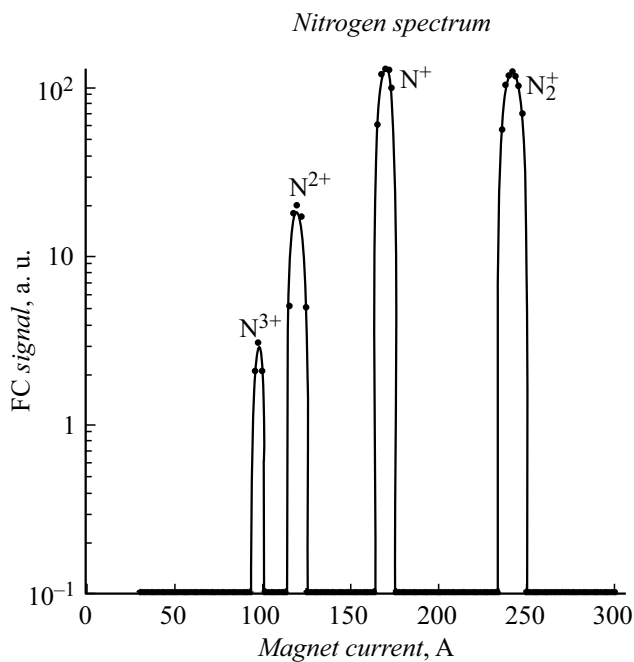
Подобная комбинация параметров является рекордной в настоящее время. Таким образом, использование квази-газодинамического источника МЗИ с накачкой мощным микроволновым излучением гиротронов позволяет получать пучки ионов с рекордными токами и умеренным средним зарядом.

Новая концепция генерации сильноточных пучков МЗИ заключается в использовании квазигазодинамического ионного источника в сочетании с линейной системой предварительного ускорения ионов и твердотельной системой их последующей дополнительной ионизации при прохождении через тонкие фольги. Оценки показывают, что ток 1 мА тяжелых ионов с зарядом +40 может быть получен при дополнительной „обдирке“ пучка с зарядом от +10 до +20 и током 10 мА.

Предшествующие эксперименты с квазигазодинамическим ЭЦР-источником в ИПФ РАН проводились в импульсном режиме с низкой частотой следования импульсов (0.1 Hz), что приводило к значительному количеству примесей в плазме и затрудняло управление ее параметрами. В частности, для решения этой проблемы было

принято решение о создании нового экспериментального стенда GISMO (gasdynamic ion source for multipurpose operation) [6] с возможностью проведения исследований в условиях непрерывного горения ЭЦР-разряда. Схема установки приведена на рис. 1. Для нагрева плазмы используется гиротрон с частотой 28 GHz и мощностью до 10 kW. Плазма удерживается в прямой магнитной ловушке с напряженностью поля до 1.5 T (в пробках), изготовленной из постоянных магнитов. Объем плазмы в разряде составляет примерно 40 cm<sup>3</sup>, что в комбинации с мощностью нагрева обеспечивает очень высокий уровень удельного энергозатрата в плазму (до 250 W/cm<sup>3</sup>). Стенд GISMO может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

Стенд оснащен магнитостатическим анализатором для анализа состава ионного пучка, охлаждаемым цилиндром Фарадея, рассчитанным на измерение тока сильноточных пучков ионов в непрерывном режиме. Данная система анализа для проведения измерений присоединяется к фланцу диагностической камеры на продольной оси системы (на рис. 1 не показан).



**Рис. 3.** Полный спектр ионного пучка, извлеченного из разряда в азоте при давлении 0.1 мТорг и мощности нагрева 5 kW.

Для формирования сильноточных пучков высокого качества используются оригинальные разработки в области систем экстракции с квазисферической формой электродов [7], обеспечивающих высокий темп ускорения ионов в окрестности плазменного электрода, тем самым снижая негативное влияние объемного заряда пучка при высокой плотности тока.

Ранее на установке GISMO были получены протонные пучки с рекордными характеристиками [8]. В рамках настоящей работы были проведены первые эксперименты по получению пучков многозарядных ионов азота. Целью экспериментов было подтвердить возможность генерации плазмы без примесей при ее высокой плотности ( $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ), экспериментально проверить основные зависимости эффективности многократной ионизации от параметров рабочих режимов, мощности нагрева и давления в разряде.

В ходе первых экспериментов в азоте при использовании для экстракции ионного пучка отверстия диаметром 1 mm были получены токи до 3 mA, что соответствует плотности тока  $380 \text{ mA/cm}^2$ . На рис. 2 представлены зависимости среднего заряда извлекаемых ионов от давления в разряде и мощности нагрева. Видно, что при понижении давления в разряде средний заряд ионов повышается, что связано с ростом температуры электронов. Аналогичный эффект виден при повышении мощности нагрева в условиях фиксированного давления.

На рис. 3 приведен полный спектр ионного пучка при разряде в азоте. Видно полное отсутствие примесей (водорода, углерода и кислорода) в пучке, что является

результатом перехода к непрерывному режиму горения разряда.

Дальнейшие эксперименты будут направлены на повышение удельного энерговклада в плазму с целью повышения среднего заряда извлекаемых ионов. Также предполагаются эксперименты в импульсном режиме, но уже с высокой частотой следования импульсов, что должно позволить проводить исследования в плазме без примесей и определить на практике предельные параметры ионных пучков, которые могут быть получены в рамках описанного подхода.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 24-19-00263).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas* (Institute of Physics, Bristol, 1996).
- [2] L. Sun, H.W. Zhao, H.Y. Zhao, W. Lu, J.W. Guo, Y. Cao, Q. Wu, C. Qian, Y. Yang, X. Fang, Z.M. Zhang, X.Z. Zhang, X.H. Guo, Z.W. Liu, *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (2), 023310 (2020). DOI: 10.1063/1.5129399
- [3] V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, S.V. Razin, A.V. Sidorov, M.E. Viktorov, *Rev. Sci. Instrum.*, **93** (3), 033502 (2022). DOI: 10.1063/5.0075486
- [4] A. Sidorov, M. Dorf, V. Zorin, A. Bokhanov, I. Izotov, S. Razin, V. Skalyga, J. Roßbach, P. Spädtke, A. Balabaev, *Rev. Sci. Instrum.*, **79** (2), 02A317 (2008). DOI: 10.1063/1.2805640
- [5] V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, O. Tarvainen, *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2), 02A702 (2014). DOI: 10.1063/1.4825074
- [6] V.A. Skalyga, A.F. Bokhanov, S.V. Golubev, I.V. Izotov, M.Yu. Kazakov, E.M. Kiseleva, R.L. Lapin, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S.S. Vybin, *Rev. Sci. Instrum.*, **90** (12), 123308 (2019). DOI: 10.1063/1.5128489
- [7] S.S. Vybin, V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, M.Yu. Kazakov, A.F. Bokhanov, S.P. Shlepnev, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **30** (12), 125008 (2021). DOI: 10.1088/1361-6595/ac38af
- [8] С.В. Барабин, Г.Н. Кропачев, А.Ю. Лукашин, Т.В. Кулевой, С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, Е.М. Киселева, В.А. Скальга, С.В. Григорьев, Н.А. Коваленко, *Письма в ЖТФ*, **47** (10), 7 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50964.18628 [S.V. Barabin, G.N. Kropachev, A.Y. Lukashin, T.V. Kulevoy, S.S. Vybin, S.V. Golubev, I.V. Izotov, E.M. Kiseleva, V.A. Skalyga, S.V. Grigoriev, N.A. Kovalenko, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 485 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021050199].