Исследование характеристик пучков многозарядных ионов, извлеченных из плазмы электронного циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 83 GHz

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

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

Поступило в Редакцию 30 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 28 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Описаны исследования генерации импульсных пучков многозарядных ионов на основе разряда, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 83 GHz и мощностью до 200 kW. Такие эксперименты являются на данный момент уникальными и стали возможны благодаря существенной модернизации установки SMIS (Simple Mirror Ion Source). В ходе работ получены данные об эффективности генерации многозарядных ионов аргона, определены плотности тока извлекаемых пучков, изучена динамика распределения свечения разряда по поперечной координате, получены данные об эмиттансе пучков с длительностью импульса 1 ms с временны́м разрешением до 30 μs.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2026.24.64028.9604k

Современные исследования в таких областях ядерной физики, как физика тяжелых ионов, синтез сверхтяжелых элементов и т. д., требуют непрерывного совершенствования существующих и разработки новых классов ионных источников с ранее недостижимыми параметрами. В частности, действующие в настоящее время источники многозарядных ионов (МЗИ) не всегда способны удовлетворить всем требованиям современных и тем более перспективных исследовательских проектов в плане обеспечения значительных токов ионов высоких кратностей ионизации. Например, в современном проекте ускорителя тяжелых ионов HIAF [1] требуется получить пучок ионов U^{35+} с током порядка 2 mA. На данный момент непосредственное получение пучка с такими характеристиками в ионном источнике не представляется возможным. Для получения требуемого пучка была предложена двухстадийная схема [2], в которой пучок ионов с умеренной кратностью ионизации (для определенности пусть это будут ионы U^{10+}) с более высоким током (порядка 10 mA) предварительно ускоряется до энергии порядка 1 MeV и затем направляется на обдирочную фольгу, где происходит увеличение кратности заряда ионов в пучке до требуемого уровня. При этом ток пучка снижается из-за потерь в фольге. Таким образом, при использовании двухстадийной схемы ионный источник должен формировать пучок ионов с умеренной кратностью ионизации с током в несколько десятков миллиампер.

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, был разработан новый тип ионных источников с нагревом плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) — сильноточный газодинамический ЭЦР-источник SMIS (Simple Mirror Ion Source) [3–5]. Плазма в таких источниках создается мощным (десятки и сотни киловатт в импульсном режиме) высокочастотным микроволновым излучением гиротронов и может иметь высокую (до 10^{14} cm^{-3}) плотность.

После модернизации газодинамического источника SMIS [6] появилась возможность для создания плазмы использовать последовательно три сменных импульсных гиротрона с частотами излучения 37, 75 и 83 GHz. Далее приводятся некоторые результаты исследований динамики импульсного ЭЦР-разряда, поддерживаемого излучением указанных частот в магнитной ловушке, а также результаты экспериментов по генерации в плотной ЭЦР-плазме многозарядных ионов и формированию из такой плазмы интенсивных пучков МЗИ с высокой плотностью тока. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [6]. Для создания и нагрева плазмы использовался импульсный (длительность импульса 0.6–1 ms) гиротрон с частотой излучения 83.3 GHz. СВЧ-излучение линейной поляризации с мощностью до 150 kW в виде гауссова пучка направлялось в плазменную (разрядную) камеру, расположенную в магнитной ловушке простой пробочной конфигурации. Для согласования СВЧ-излучения с плазмой использовалась электродинамическая система в виде металлического клина специальной формы, расположенного в вакуумной камере перед магнитной ловушкой и направленного своим острием навстречу излучению гиротрона (рис. 1). При этом торец клина находился вблизи магнитной пробки ловушки. Напуск плазмообразующего газа (азот,

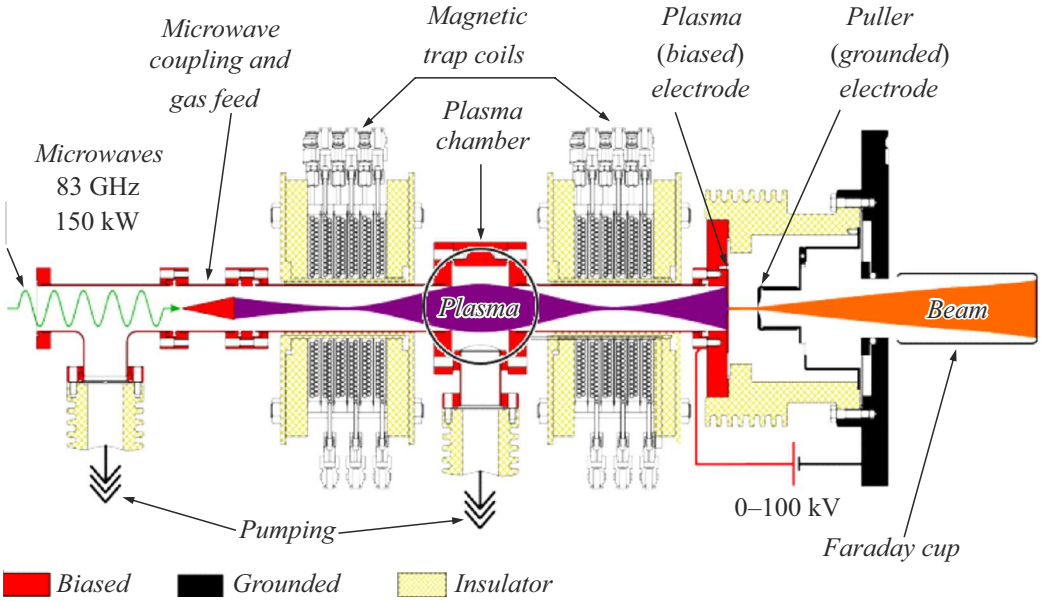


Рис. 1. Схема разрядной камеры и электродинамической системы согласования СВЧ-излучения с плазмой ЭЦР-разряда. Показано сечение в вертикальной плоскости. Разрядная камера имеет оптическое вакуумное окно, которое позволяет наблюдать динамику плазмы. Видимая область разряда выделена окружностью в центральной части ловушки. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

аргон) осуществлялся непрерывно или импульсно вдоль продольной оси системы непосредственно в магнитную ловушку через проходящий внутри клина канал, выходная апертура которого располагалась на торце клина. Характерное давление напускаемого газа в разрядной камере в момент подачи СВЧ-излучения составляет 1 mTorr. Данная электродинамическая система фокусировала проходящий через нее гауссов пучок внутрь магнитной ловушки в область зоны ЭЦР.

Ионные пучки создавались двухапертурным экстрактором (плазменный электрод и пуллер) квазипирсовой геометрии, расположенным в 11 cm от магнитной пробки ловушки в потоке разлетающейся по магнитным силовым линиям плазмы. Диаметр отверстия в плазменном электроде составлял 3 mm. Ток ионного пучка измерялся цилиндром Фарадея, расположенным вблизи выхода пуллера, а распределение ионов по кратностям ионизации в пучке определялось с помощью магнитного анализатора. Также в экспериментах проводилось фотографирование свечения плазмы разряда в видимом диапазоне перпендикулярно продольной оси магнитной ловушки в ее центральной части, где имелось оптическое вакуумное окно (видимая область разряда выделена окружностью на рис. 1), с помощью скоростной фотокамеры „Chronos 2.1-HD“. Данная камера позволяла получать снимки с частотой следования до 1000 fps при разрешении 1920×1080 пикселей, минимальное время экспозиции составляло $10\,\mu$s. Также с помощью данной камеры впервые проводилось скоростное измерение эмиттанса пучка. Распределение пучка в фазовом пространстве определялось при помощи метода pepper-pot. Суть метода заключается в следующем. На пути следования ионного пучка располагается пластина (маска pepper-pot) с отверстиями, расположенными в узлах прямоугольной сетки, которая разбивает цельный пучок на несколько отдельных частей меньшего размера. Затем пучки попадают на сцинтиллятор (кристалл CsI), где локально генерируется излучение, регистрируемое фотокамерой.

На рис. 2, *a* для примера показана типичная осциллограмма суммарного по зарядам тока ионного пучка, полученного в экспериментах при использовании для нагрева плазмы микроволнового излучения с частотой 83 GHz в режиме генерации многозарядных ионов. Из осциллограммы видно, что существует два интервала времени (две стадии), в течение которых ионные токи существенно различаются (приблизительно в 3 раза). На рис. 2, *b* приведено распределение ионов аргона по зарядовым состояниям в ионном пучке, полученное в первой половине СВЧ-импульса.

Были выполнены измерения зависимости суммарного по зарядам тока ионного пучка от напряжения экстракции, полученные в режиме наиболее эффективной генерации многозарядных ионов в условиях нагрева плазмы излучением с частотой 83 GHz и мощностью 150 kW. При достигнутых напряжениях экстракции (45 kV) ток ионного пучка достигал величины 45 mA (что соответствует плотности тока в отверстии плазменного электрода 640 mA/cm^2 или при пересчете для пробки магнитной ловушки 7 A/cm^2), что в 3 раза превышает ток пучка, ранее полученный в случае использования гиротрона с частотой излучения 37 GHz.

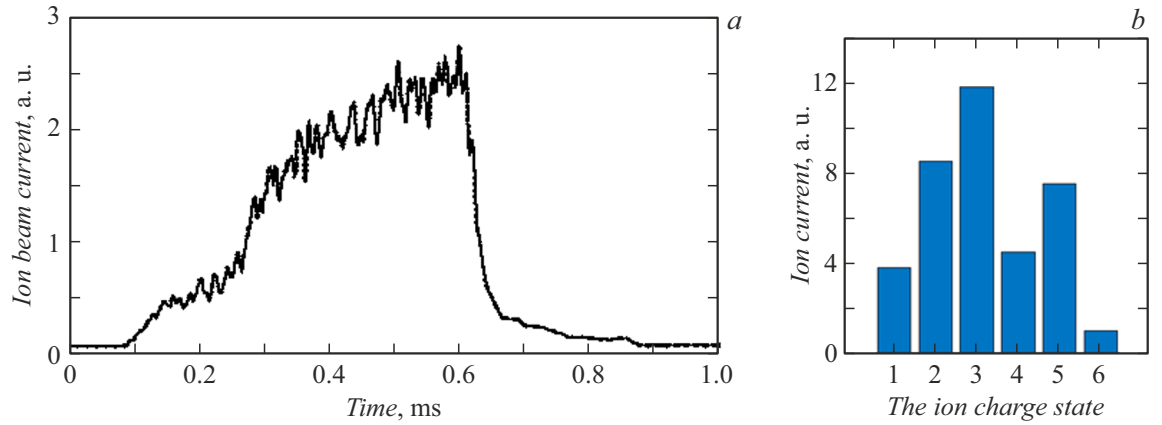


Рис. 2. *a* — типичная осциллограмма суммарного по зарядам тока ионного пучка на цилиндр Фарадея при нагреве плазмы микроволновым излучением 83 GHz в режиме генерации МЗИ. Напряжение экстракции 40 kV, рабочий газ — аргон, напуск газа импульсный. Магнитное поле в пробках ловушки 4.1 T, СВЧ-мощность 80 kW. *b* — распределение ионов аргона по зарядовым состояниям в первой половине СВЧ-импульса. Пик тока иона Ar^{5+} выделяется на спектре из-за вклада ионов O^{2+} в ток, поскольку у этих ионов совпадает отношение заряда к массе.

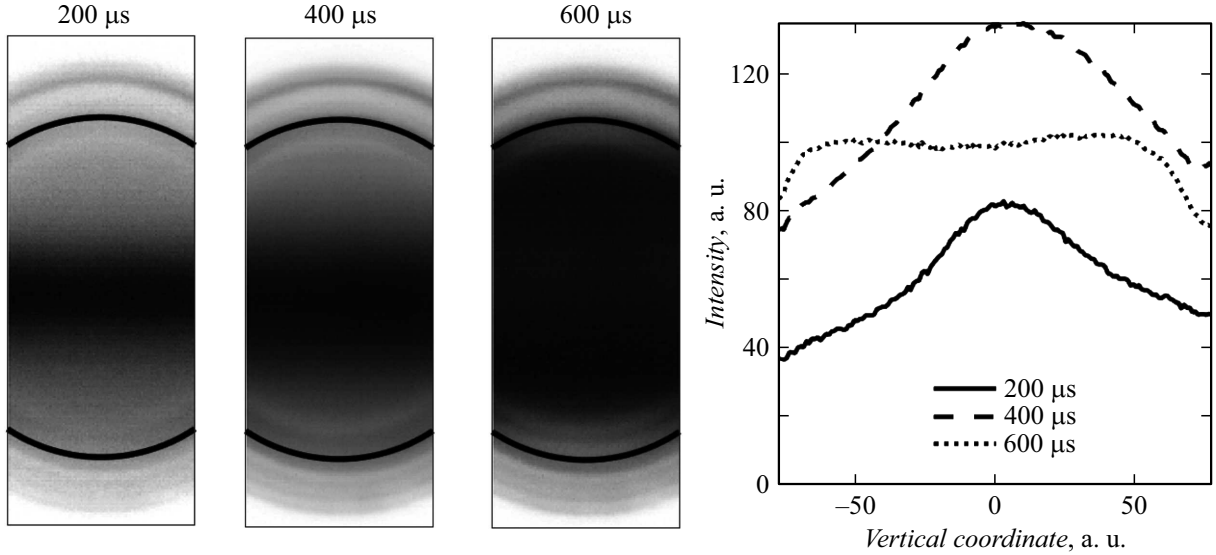


Рис. 3. Последовательность „мгновенных“ (время экспозиции 20 μs) изображений свечения плазмы ЭЦР-разряда в магнитной ловушке в аргоне. Над каждым кадром указано время, прошедшее от начала разряда. Справа показаны профили светимости плазмы. СВЧ-излучение падает слева.

В ходе исследований было установлено, что первая и вторая стадии разряда существенно различаются параметрами плазмы. Первая стадия характеризуется, очевидно, более высокой температурой электронов T_e и относительно низкой электронной концентрацией N_e. Для второй же стадии характерна, по-видимому, относительно низкая T_e и более высокая N_e.

В дополнение к описанным экспериментам было проведено фотографирование свечения плазмы ЭЦР-разряда в видимом диапазоне перпендикулярно продольной оси магнитной ловушки в ее центральной части с помощью упоминавшийся выше скоростной фотокамеры. На рис. 3 представлена последовательность „мгновенных“ снимков свечения разрядной плазмы.

Из приведенных изображений видно, что существует некоторый интервал времени, в течение которого светящаяся плазма локализована преимущественно в приосевой области разрядной камеры и представляет собой цилиндр, вытянутый вдоль продольной оси магнитной ловушки (первая, или приосевая, стадия разряда). Затем плазма начинает расширяться поперек силовых линий магнитного поля к периферии разрядной камеры, занимая все больший объем (вторая, или объемная, стадия разряда). Основываясь на результатах скоростной фотосъемки, наблюдаемую динамику распределения ионов по зарядовым состояниям можно объяснить следующим образом. После возникновения разряда по мере нагрева плазмы происходит рост электронной температуры, уве-

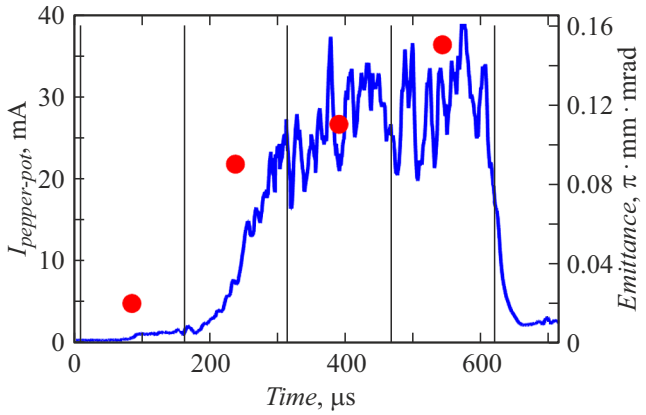


Рис. 4. Осциллограмма тока пучка на маску pepper-pot (линия) и зависимость эмиттанса пучка (кружки) от времени.

личение среднего заряда ионов и концентрации электронов. В дальнейшем, во второй половине импульса гиротрона, по-видимому, наступает момент, когда плотность плазмы становится достаточно высокой, вследствие чего происходит частичная экранировка центральной области плазмы, откуда осуществляется экстракция многозарядных ионов. В результате температура электронов падает, эффективность образования МЗИ снижается, и средний заряд извлекаемых ионов уменьшается, что и наблюдается в экспериментах.

С помощью метода pepper-pot и скоростной фотокамеры были получены данные об эмиттансе пучков. Так как результаты измерений показывают значительное изменение параметров разряда с течением времени внутри одного импульса, впервые были выполнены исследования эмиттанса пучка с временны́м разрешением до 100 μs. На рис. 4 на фоне характерной осциллограммы тока пучка кружками отмечены полученные значения эмиттанса. При токе пучка ионов аргона 30 mA его среднеквадратичный нормализованный эмиттанс составил $0.15\,\pi \cdot \mathrm{mm} \cdot \mathrm{mrad}$, что свидетельствует о хорошем качестве получаемого пучка.

Приведенные выше экспериментальные данные указывают на необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на оптимизацию согласования греющего СВЧ-излучения с плазмой и улучшение нагрева плазмы на оси магнитной ловушки.

Эксперименты, проведенные на квазигазодинамическом ионном источнике SMIS с нагревом плотной плазмы излучением 83 GHz, продемонстрировали возможность генерации МЗИ и формирования их пучков с высокими током (на уровне 40–50 mA) и плотностью (более 600 mA/cm^2). Использование более высокочастотного и мощного микроволнового нагрева (83 GHz вместо 37 GHz) позволило значительно (примерно в 3 раза) увеличить ток пучка многозарядных ионов. Дальнейшие эксперименты будут направлены на исследования при более высоких мощностях СВЧ-нагрева и оптимизацию согласования греющего СВЧ-излучения с плазмой.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00263.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] X. Zhou, J. Yang, and the HIAF project team, AAPPS Bull., **32** (1), 35 (2022). DOI: 10.1007/s43673-022-00064-1
[2] Y. Lu, J. Ma, P. Zhang, L. Li, Y. Liu, H. Zhao, L. Sun, H. Zhao, J. Phys.: Conf. Ser., **3237** (1), 012038 (2026). DOI: 10.1088/1742-6596/3237/1/012038
[3] S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, A. Bokhanov, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **256** (1), 537 (2007). DOI: 10.1016/j.nimb.2006.12.053
[4] 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
[5] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Vodopyanov, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas, Rev. Sci. Instrum., **87**, 02A716 (2016). DOI: 10.1063/1.4934213
[6] В.А. Скалыга, С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, А.В. Поляков, С.В. Разин, Д.М. Смагин, Письма в ЖТФ, **51** (23), 20 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61673.7889 [V.A. Skalyga, S.S. Vybin, S.V. Golubev, I.V. Izotov, A.V. Polyakov, S.V. Razin, D.M. Smagin, Tech. Phys. Lett., **51** (12), 17 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.12.62784.7889].