

Электронно-циклотронный резонансный разряд высокой плотности, поддерживаемый излучением гиротрона, для генерации интенсивных 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 25 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 20 июня 2025 г.

Принято к публикации 18 июля 2025 г.

Развитие исследований в области ядерной физики стимулирует постановку амбициозных задач в сфере разработки ионных источников с ранее недоступными характеристиками. Существующие сегодня источники многозарядных ионов (МЗИ) не в состоянии удовлетворить всем требованиям флагманских проектов и обеспечить достаточно высокий ток ионов с высоким зарядом. Один из подходов к созданию требуемых источников МЗИ связан с использованием сильноточного квазигазодинамического источника МЗИ. Для проведения данных исследований в Институте прикладной физики РАН используется установка SMIS 37/75 после ее существенной модернизации. Описаны основные результаты этих исследований.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61673.7889

Результатом экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, стала разработка нового типа источников ионов с нагревом плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) — газодинамического ЭЦР-источника [1,2]. В таком источнике реализуется механизм удержания в магнитной ловушке, отличный от механизма удержания в традиционных ЭЦР-источниках Желерра [3], а именно квазигазодинамический, аналогичный механизму удержания в термоядерных зеркальных ловушках. Экспериментальные исследования такого ЭЦР-источника проводились на установке SMIS 37. Плазма создавалась излучением гиротронов на частотах 37.5 и 75 GHz мощностью до 100 kW с длительностью импульса 1 ms. Высокочастотное микроволновое излучение позволило создать и поддерживать плазму значительной плотности (до $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), а также сохранить основные преимущества традиционных ЭЦР-источников, такие как высокая степень ионизации и низкая энергия ионов. Достижение такой высокой плотности плазмы обеспечивается ростом критической плотности пропорционально квадрату частоты греющего излучения. Высокая мощность СВЧ обеспечивала среднюю энергию электронов на уровне 50–300 eV, достаточную для эффективной ионизации даже в диапазоне давлений газа 10^{-4} – 10^{-3} mbar. Газодинамический ЭЦР-источник продемонстрировал хорошие характеристики при создании сильноточных (100–300 mA) пучков многозарядных ионов с умеренным средним зарядом ($Z = 4$ –5 для аргона). На основе данных разработок была сформули-

рована новая концепция генерации сильноточных пучков многозарядных ионов (МЗИ), которая заключается в использовании квазигазодинамического ионного источника в сочетании с линейной системой предварительного ускорения (до энергий порядка 1 MeV) и дополнительной твердотельной системой „обдирки“ (фольгистриппера). Оценки показывают, что пучок с током 1 mA тяжелых ионов с зарядом +40 может быть получен при дополнительной „обдирке“ пучка с зарядом от +10 до +20 и током 10 mA [4].

Отметим, что у исходной конфигурации экспериментального стенда SMIS была низкая частота следования импульсов (менее 0.1 Hz), что приводило к низкой эффективности очистки стенок плазменной камеры разрядом и низкой эффективности управления параметрами плазмы. Значительный поток примесей со стенок приводил к быстрому росту концентрации плазмы до значений выше критической, что приводило к сильному отражению вводимого излучения и остыванию плазмы.

В настоящее время проведена глубокая модернизация установки SMIS 37, позволившая вывести экспериментальные исследования на новый уровень. Самой главной целью являлось увеличение частоты следования СВЧ-импульсов, создающих плазму, с 0.1 до 5 Hz. Такое увеличение частоты следования разрядных импульсов позволяет в значительной степени избавиться от различных примесей (кислород, углерод и др.), неконтролируемо поступающих в плазму со стенок разрядной камеры и существенно влияющих на ее основные характеристики: концентрацию и температуру электронов.

В состав экспериментального стенда SMIS 37/75 входят следующие основные узлы и системы:

- 1) источник мощного СВЧ-излучения — гиротрон (попеременно могут использоваться два гиротрона с частотой излучения 37.5 и 75 GHz);
- 2) высоковольтный источник питания гиротрона;
- 3) криостат со сверхпроводящим соленоидом — криомагнит, необходимый для работы гиротрона;
- 4) источник питания сверхпроводящего соленоида (криомагнита);
- 5) система рекуперации жидкого гелия;
- 6) квазиоптический тракт, с помощью которого СВЧ-излучение гиротрона направляется и фокусируется в плазменную (разрядную) камеру, находящуюся в импульсной магнитной ловушке;
- 7) импульсная магнитная ловушка;
- 8) высоковольтный источник питания магнитной ловушки;
- 9) плазменная (разрядная) вакуумная камера с системой напуска плазмообразующего газа;
- 10) система формирования ионного пучка (экстрактор);
- 11) высоковольтный источник питания экстрактора;
- 12) диагностическая вакуумная камера;
- 13) система измерения параметров плазмы ЭЦР-разряда и формируемых ионных пучков (система диагностики);
- 14) система вакуумной откачки;
- 15) система водяного охлаждения;
- 16) система синхронизации и управления установкой;
- 17) система блокировок и рентгеновская защита.

Общий вид стенда показан на рис. 1. Рассмотрим подробнее перечисленные выше основные составляющие части стенда. Гиротрон — источник мощного СВЧ-излучения, с помощью которого создается плазма ЭЦР-разряда.

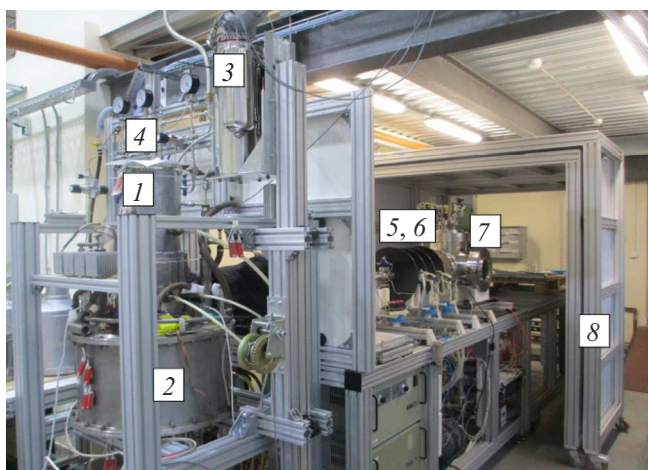


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда SMIS 37/75. Структурная схема установки. 1 — гиротрон, 2 — криостат, 3 — реконденсатор, 4 — гелиевая магистраль, 5 — соленоиды, 6 — плазменная камера, расположенная в магнитной ловушке, 7 — диагностическая вакуумная камера, 8 — рентгеновская и СВЧ-защита стенда.

В распоряжении коллектива участников проекта имеются два гиротрона с частотами излучения 37.5 GHz (импульсная мощность до 80 kW) и 75 GHz (импульсная мощность до 250 kW). Необходимое для работы гиротрона магнитное поле (1.34 Т для 37.5 GHz и 2.68 Т для 75 GHz) создается сверхпроводящим соленоидом (криомагнитом), расположенным внутри рабочего объема криостата. Для перевода соленоида в сверхпроводящее состояние криостат заливается жидким гелием. За сутки из имеющегося на установке SMIS 37/75 криостата „выкипает“ около 71 жидкого гелия. С целью свести к минимуму потери указанного дорогостоящего хладагента на установке была установлена система рекуперации жидкого гелия фирмы CRYOMECH, состоящая из реконденсатора, обеспечивающего температуру сжижения паров гелия (около 4 K), и компрессора, соединенных гелиевой магистралью высокого давления.

Мощность СВЧ-излучения гиротрона легко варьировать, изменяя магнитное поле сверхпроводящего соленоида, т.е. изменяя ток криомагнита. СВЧ-излучение гиротрона направляется и фокусируется в плазменную (разрядную) камеру с помощью квазиоптического тракта, состоящего из двух зеркал: корректирующего и фокусирующего. Система питания позволяет варьировать длительность импульса СВЧ-излучения от 50 до 1000 μ s.

Импульсная магнитная ловушка (рис. 2) предназначена для создания сильного (до 4 Т) магнитного поля, необходимого для обеспечения внутри разрядной (плазменной) вакуумной камеры условий ЭЦР. Ловушка состоит из двух последовательно соединенных соленоидов, создающих конфигурацию магнитного поля с двумя максимумами (магнитными пробками) на продольной оси. Такая конфигурация обеспечивает удержание плазмы в пространстве между указанными максимумами. Соленоиды намотаны медной трубкой, заключены в каркас и имеют водяное охлаждение.

В ходе модернизации были заменены источники питания гиротрона и магнитной ловушки, усовершенствована система охлаждения катушек, организовано охлаждение плазменной камеры и входного СВЧ-окна.

В плазменной (разрядной) вакуумной камере с клапаном напуска плазмообразующего газа, находящейся в магнитной ловушке, в условиях ЭЦР под действием СВЧ-излучения гиротрона возникает и нагревается плазма, в которой образуются многозарядные ионы. При формировании ионного пучка на камеру подается высокий (до 70 kV) положительный потенциал, поэтому она изолирована от „земли“ и соленоидов магнитной ловушки высоковольтными изоляторами.

На выходе плазменной камеры (вне магнитной ловушки) расположена система формирования ионного пучка — экстрактор, состоящий из двух электродов определенной (регулируемой) геометрии с отверстиями для извлечения ионов. Один электрод — плазменный — имеет электрический контакт с плазменной (разрядной) камерой и находится под высоким (до 70 kV) положи-

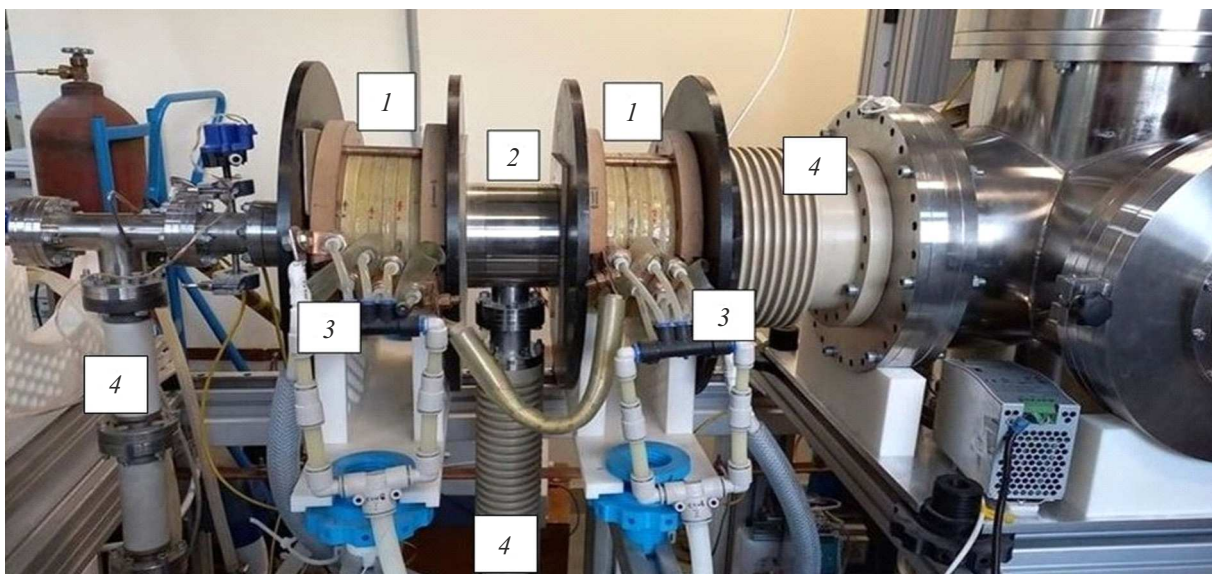


Рис. 2. Импульсная магнитная ловушка. 1 — соленоиды, 2 — плазменная камера, расположенная в магнитной ловушке, 3 — трубы водяного охлаждения, 4 — высоковольтные изоляторы.

тельным потенциалом, другой электрод — пуллер — под нулевым.

Сформированный экстрактором ионный пучок направляется в диагностическую вакуумную камеру. Камера имеет стандартные фланцы CF с проходными отверстиями 250 mm. С помощью различных диагностических элементов, расположенных внутри камеры (цилиндры Фарадея с различными диаметрами входной апертуры, сцинтиллятор, пластина „perpex-rot“), осуществляется измерение таких характеристик ионного пучка, как его полный ток, поперечная структура и эмиттанс. Кроме того, с помощью присоединяемого к диагностической камере магнитостатического ионного анализатора имеется возможность измерять массовый и ионный состав пучка с разрешением по параметру „кратность ионизации/удельная масса иона“ около 20.

Для создания плазмы ЭЦР-разряда и формирования из нее ионных пучков с дальнейшим диагностированием их параметров в вакуумных камерах экспериментального стенда необходимо поддерживать давление в пределах от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-7}$ Torr.

Система управления и синхронизации собрана на базе персонального компьютера и современных программируемых микроконтроллеров. С помощью разработанной управляющей программы не только осуществляются регулирование и контроль основных рабочих параметров установки, но и задаются необходимые временные задержки между формируемыми системой синхроимпульсами запуска исполнительных устройств, обеспечивающих своевременное срабатывание соответствующего оборудования экспериментального комплекса (клапана импульсного напуска рабочего газа, магнитной ловушки, гиротрона, экстрактора и др.).

Таким образом, проведенная модернизация экспериментального стенда SMIS 37/75 позволила увеличить частоту следования разрядных импульсов с 0.1 до 5 Hz, что имеет решающее значение для радикального уменьшения количества примесей, неконтролируемо поступающих в плазму с внутренних стенок плазменной камеры и влияющих на основные характеристики разрядной плазмы (концентрацию и температуру электронов). Также была проведена оптимизация режимов работы гиротрона с частотой 37 GHz, что позволило на первом этапе повысить его максимальную мощность до 130 kW. В дальнейшем планируется повысить этот параметр до 250 kW за счет применения дополнительного соленоида в катодной области гиротрона и оптимизации pitch-угла электронного пучка вакуумной лампы.

Была проведена работа, направленная на определение предельных параметров пучков многозарядных ионов, которые могут быть получены в схеме сильноточного ЭЦР-источника МЗИ с квазигазодинамическим режимом удержания при накачке излучением 37 GHz. В качестве химического элемента с большим атомным номером, но при этом являющегося газом при нормальных условиях был выбран ксенон. На рис. 3, а представлено распределение по кратностям ионизации в ксеноне на стенде SMIS 37 до его модернизации. Видно, что количество примесей в плазме очень значительно, с чем связан не очень высокий средний заряд. Экспериментальные исследования показали, что высокая частота следования импульсов позволяет принципиально изменить уровень примесных ионов (снизить его более чем на порядок). В этом случае становится возможным достижение распределения, показанного на рис. 3, б.

Средний заряд ионов ожидается на уровне +8 при плотности тока в пробке ловушки на уровне нескольких

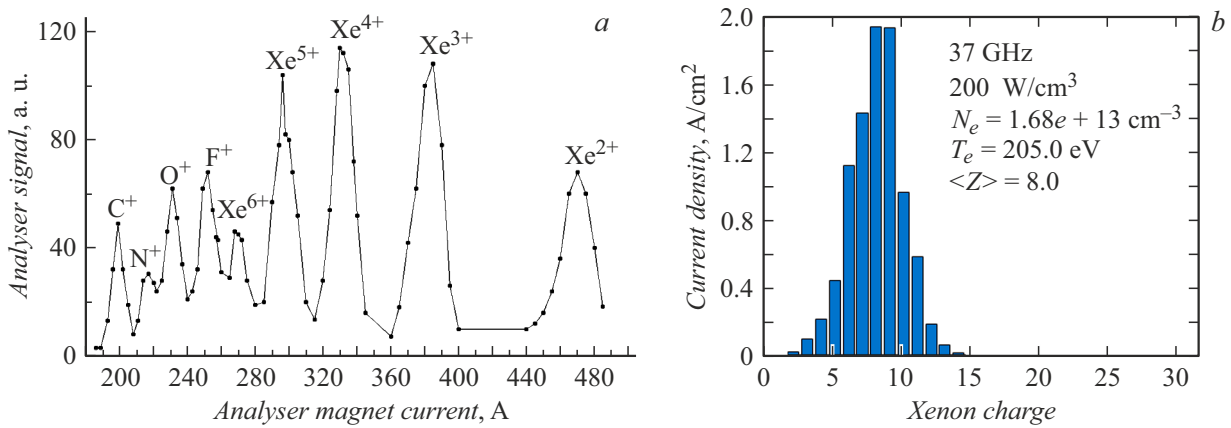


Рис. 3. *a* — распределение ионов по кратностям ионизации в разряде в ксеноне до модернизации стенда SMIS 37, нагрев излучением 37.5 GHz с мощностью 80 kW; *b* — распределение ионов ксенона по кратностям ионизации в разряде без примесей при нагреве излучением 37.5 GHz с мощностью 100 kW.

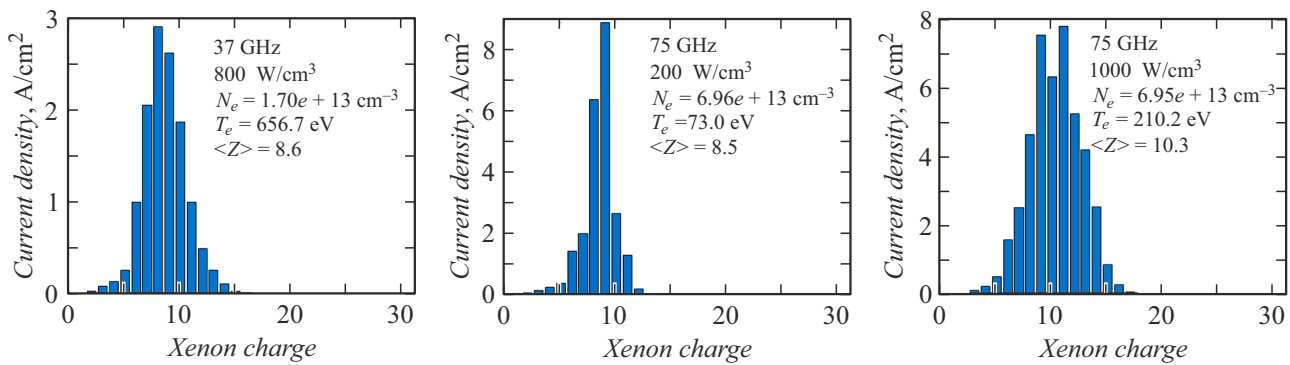


Рис. 4. Распределения ионов ксенона по кратностям ионизации при различных значениях удельного энерговклада в плазму и ее плотностей.

ампер через квадратный сантиметр. Представленное распределение получено путем численного моделирования с помощью программного кода [5], разработанного авторами и прошедшего верификацию на большом объеме экспериментальных данных с нескольких установок в России и за рубежом. В ходе первых экспериментов на модернизированной установке было продемонстрировано, что в составе ионного пучка пропали такие примеси, как углерод, фтор, азот, а количество водорода и кислорода (составляющие воды) существенно снизилось.

Также проведены работы, направленные на получение ожидаемой зависимости характеристик пучков МЗИ, генерируемых сильноточным ЭЦР-источником с квазигазодинамическим режимом удержания, от мощности излучения. Экспериментально повышение удельного энерговклада в плазму будет осуществляться двумя способами: повышением мощности излучения гиротрона и изменением объема нагреваемой плазмы за счет использования разных магнитных систем. Продольные размеры плазмы определяются расстоянием между магнитными пробками, т.е. длиной ловушки, а поперечные размеры могут задаваться дополнительными металлическими

лимитерами, в том числе диаметром непосредственно плазменной камеры. В ходе численного моделирования показано, что применение обоих подходов одновременно позволяет поднять удельный энерговклад в плазму до 1 kW на кубический сантиметр. В таком случае при использовании для нагрева плазмы излучения с частотой 75 GHz плотность может достигать $7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при температуре электронов до 210 eV. В этом случае будет наблюдаться существенный рост эффективности ионизации. На рис. 4 показаны предельные характеристики потоков ионов ксенона из ловушки. В эксперименте, скорее всего, при таком среднем заряде начнут серьезно сказываться потери на излучение плазмы в диапазоне вакуумного ультрафиолета, и итоговый результат ожидается чуть ниже.

Результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют возможность получения сильноточных пучков ионов тяжелых элементов с зарядом на уровне +10. Также можно отметить, что из центрального фрагмента рис. 4 видно, что оптимизация температуры при высокой плотности позволяет реализовать более узкое распределение по зарядам, что удобно с точки зрения формирования

пучка и сепарации конкретного иона. Такой эффект сужения распределения связан с резким ростом потенциала ионизации при переходе с одной электронной оболочки на другую (более глубокую).

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] 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
- [2] 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
- [3] R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas* (Institute of Physics, Bristol, 1996). DOI: 10.1201/9780203758663
- [4] В.А. Скалыга, С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, А.В. Поляков, С.В. Разин, Д.М. Смагин, *Письма в ЖТФ*, **50** (24), 53 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59439.6573k [V.A. Skalyga, S.S. Vybin, S.V. Golubev, I.V. Izotov, A.V. Polyakov, S.V. Razin, D.M. Smagin, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (12), 128 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60373.6573k].
- [5] V. Skalyga, I. Izotov, V. Zorin, A. Sidorov, *Phys. Plasmas*, **19**, 023509 (2012). DOI: 10.1063/1.3683561