

## Применение плотной плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда для генерации положительных и отрицательных ионов водорода

© В.А. Скалыга, И.В. Изотов, С.С. Выбин, С.В. Голубев, А.В. Поляков, Е.М. Киселёва, Р.Л. Лапин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: skalyga@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Одним из перспективных источников сильноточных пучков положительных и отрицательных ионов представляется разряд, поддерживаемый в условиях электронно-циклотронного резонанса в открытых магнитных ловушках мощным излучением миллиметрового диапазона длин волн. В ИПФ РАН проведены разработки импульсных и непрерывных источников положительных ионов изотопов водорода с рекордными по качеству и составу формируемых пучков характеристиками. Представлены последние результаты по генерации ионных пучков для инжекции в ускорители, полученные на экспериментальных установках SMIS 37 и GISMO. В настоящее время также рассматривается вариант модернизации таких систем для получения пучков отрицательных ионов.

**Ключевые слова:** электронный циклотронный разряд, гиротрон, пучки ионов водорода.

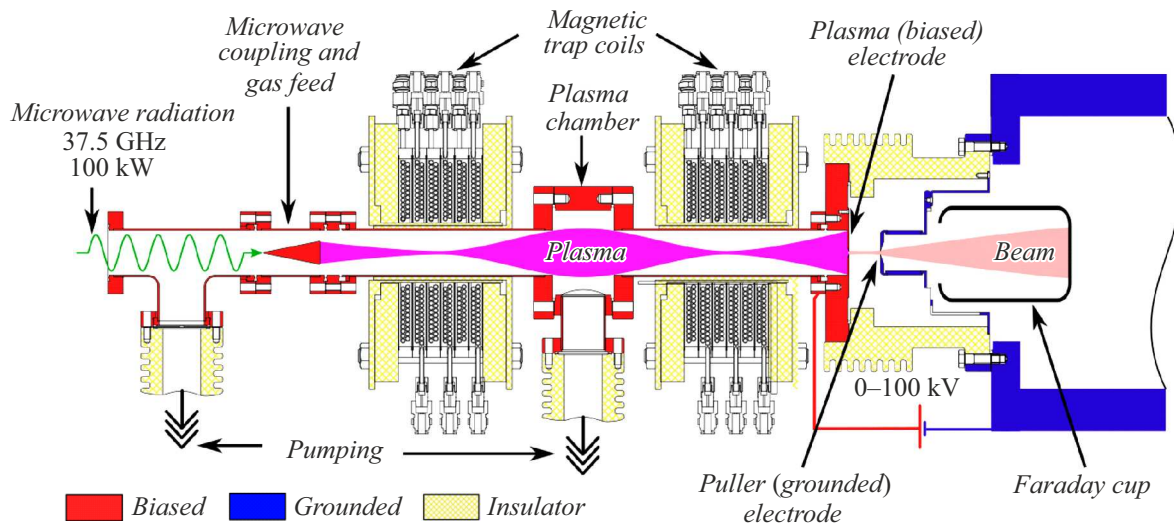
DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56869.83A

Методы создания водородной плазмы и извлечения из нее пучков ионов разных типов ( $H^+$ ,  $H^{2+}$ ,  $H^{3+}$ ,  $D^+$ ,  $H^-$ ,  $D^-$ ) во многих аспектах являются хорошо изученными и позволяют реализовать генерацию пучков в импульсном и непрерывном режимах в диапазоне тока от микроампер до сотен ампер. В источниках ионов водорода широко применяются разряды разных типов: дуговой [1] и вакуумно-дуговой [2], высокочастотный (ВЧ) индукционный [1,3], пеннинговский [4], электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) [5,6]. Разные разряды имеют определенные преимущества, которые делают их оптимальными для различных задач. Например, дуговые разряды являются удобными в плане простоты конструкции для импульсных режимов с большой скажностью, ВЧ-системы часто применяются для формирования широкоапертурных однородных потоков плазмы и пучков с большим полным током, ЭЦР-разряды с нагревом излучением магнетрона с частотой 2.45 GHz эффективны для получения пучков высокого качества с током до 100 mA (протонов или дейтронов) с целью инжекции в ускорители.

Задача получения пучков отрицательных ионов водорода имеет еще большее разнообразие подходов к решению, так как кроме варьирования метода создания первичной плазмы могут использоваться различные механизмы генерации самих отрицательных ионов в ней. Наиболее часто сейчас применяются два таких механизма: объемный и поверхностный. В настоящей работе рассматривается только объемный, или объемно-плазменный, метод, в основе которого лежит создание газоразрядной плазмы с высокой концентрацией отри-

цательных ионов. Образование отрицательных ионов происходит в две стадии: возбуждение молекул водорода до высоких колебательных уровней и последующее диссоциативное прилипание электрона к такой молекуле. Колебательное возбуждение молекул  $H_2$  электронами с энергией  $> 10$  eV повышает эффективность образования отрицательных ионов, однако так же эффективно их разрушает при последующих столкновениях. Для разрешения данного противоречия используется „тандемный“ метод, при котором объем плазмы делится на две области: с горячими электронами ( $T_e > 10$  eV) для возбуждения молекул и с холодными электронами ( $T_e$  порядка 1 eV) для образования отрицательных ионов из возбужденных  $H_2$ . Для разделения областей используется, например, поперечное градиенту температур магнитное поле — магнитный фильтр.

Из-за высокой степени проработки перечисленных методов дальнейшее последовательное повышение характеристик генерируемых пучков положительных и отрицательных ионов водорода становится все более затруднительным. Тем не менее постоянный научный прогресс приводит к появлению новых задач, требующих получения ионных пучков с ранее недоступными характеристиками. Часто выход в таких ситуациях находится при рассмотрении новых нестандартных подходов. В настоящей работе представлены последние результаты комплекса исследований, проводимых в ИПФ РАН, использующих экзотический подход к созданию водородной плазмы с целью разработки источников различных ионов водорода.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки SMIS (источник СВЧ-излучения не показан). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

В работе рассматривается применение плотной сильнонеравновесной плазмы ЭЦР-разряда, поддерживаемого мощным (1–100 kW) излучением гиротронов миллиметрового диапазона частот в открытых осесимметричных магнитных ловушках. Такой подход принципиально отличается от стандартного нагрева излучением магнетрона на частоте 2.45 GHz с киловаттным уровнем мощности тем, что генерируемая плазма имеет на порядок более высокую плотность (до  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) и на порядок более высокую температуру электронов (50–100 eV) [7]. Такое сочетание параметров плазмы не реализуется в других типах разрядов и позволяет получать плотные потоки плазмы, которые могут быть успешно использованы для генерации ионных пучков с рекордными параметрами.

ЭЦР-ионные источники, исследуемые в ИПФ РАН, характеризуются высокой частотой (28–75 GHz) и мощностью (10–100 kW) греющего излучения. Также с учетом сравнительно небольшого объема плазмы достигается высокий удельный энерговыход (на уровне  $200 \text{ W/cm}^3$ ). В ИПФ РАН находятся два ионных источника: SMIS (Simple Mirror Ion Source), работающий в импульсном режиме, и GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) — установка с возможностью непрерывного режима работы.

Схема плазменной части установки SMIS (не показан источник СВЧ-излучения, гиротрон) представлена на рис. 1. Плазма создается с помощью импульсного СВЧ-излучения гиротрона на частоте 37.5 GHz при мощности до 100 kW и длительности импульса 1 ms (при использовании излучения гиротрона на частоте 75 GHz мощность достигала 200 kW). СВЧ-излучение вводится в разрядную камеру с помощью электродинамической системы, в которую также встроен канал подачи газа. Нейтральный газ подается вдоль оси плазменной камеры. Плазменная камера имеет внутренний диаметр 38 mm.

Для удержания плазмы используется простая магнитная ловушка. Пробочное отношение равно  $R = 5$ . Расстояние между пробками составляет  $L_{plug} = 250 \text{ mm}$ . Магнитное поле создается катушками в импульсном режиме. Максимальное магнитное поле в пробке достигает 4 T. Период следования импульсов составляет около 10 s. Характерные параметры водородной плазмы следующие: плотность на уровне  $(2-6) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , температура электронов в диапазоне 50–300 eV, степень ионизации близка к 100%. Такое сочетание температуры и плотности обеспечивает высокую плотность потока плазмы из ловушки и соответствует квазигазодинамическому режиму удержания с характерным временем жизни плазмы около 10–20  $\mu\text{s}$ . Высокая концентрация плазмы и малое время жизни обеспечивают плотность ионного тока в пробке, превышающую  $10 \text{ A/cm}^2$ . Для снижения плотности потока до приемлемого для формирования пучка уровня система экстракции вынесена за магнитную пробку ловушки в область более слабого магнитного поля.

На установке SMIS при экстракции пучка через отверстие диаметром 10 mm был получен ток ионов водорода 500 mA при содержании протонов в пучке примерно 94%, что превышает рекордные значения для ЭЦР-ионных источников с нагревом на частоте 2.45 GHz. С использованием экстрактора с неоднородным электрическим полем [8] на установке SMIS при экстракции через отверстие 5 mm был получен ионный пучок с током 225 mA, что соответствует рекордной плотности тока пучка более  $1.15 \text{ A/cm}^2$ .

Для исследований генерации отрицательных ионов на стенде SMIS магнитная система была дополнена еще одной катушкой так, чтобы получились две последовательные простые магнитные ловушки. Такой подход позволил реализовать „тандемную“ схему ионного источника, состоящую из двух частей: первая — первич-

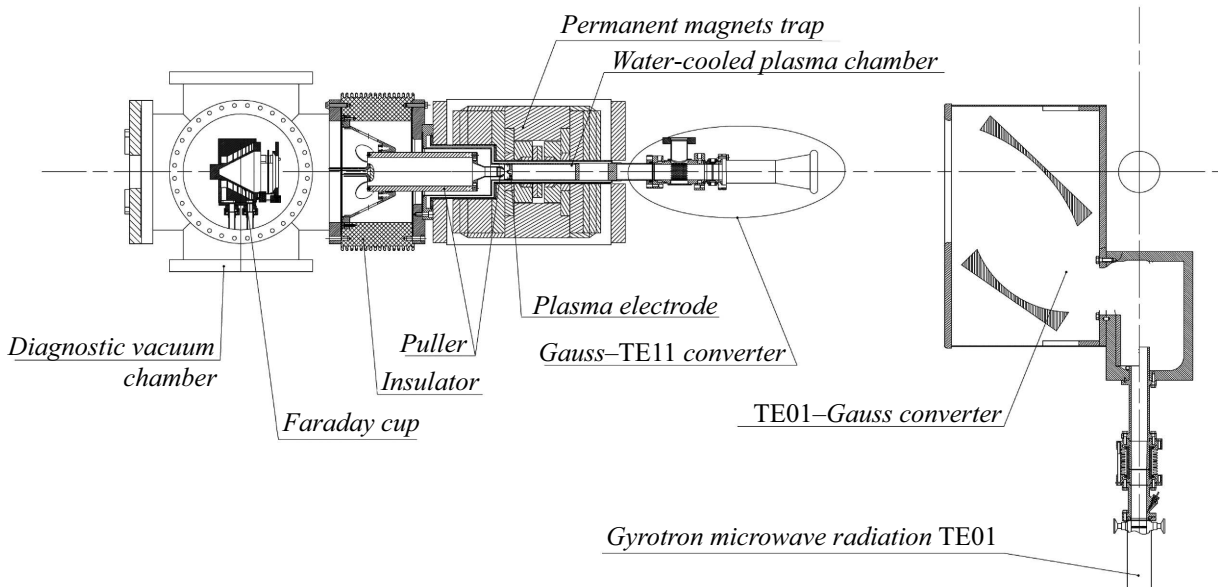


Рис. 2. Схема экспериментальной установки GISMO (источник СВЧ-излучения не показан).

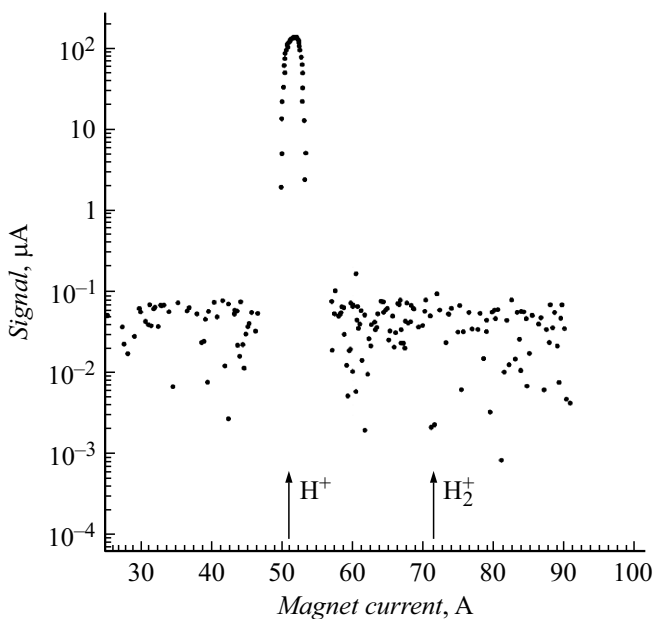
ный источник водородной плазмы, вторая — область генерации отрицательных ионов со специально оптимизированными параметрами. В использованной схеме плазма нагревалась в первой ловушке, возбужденные молекулы из нее поступали во вторую, где они взаимодействовали с холодными электронами, рожденными при ионизации газа уже во второй ловушке. В ходе экспериментов были выделены два характерных режима: режим квазистационарной генерации отрицательных ионов водорода в течение всего импульса, поддерживающего разряд микроволнового излучения гиротрона, и режим со всплеском тока отрицательных ионов после окончания микроволнового импульса (режим „послесвечения“). Эксперименты показали, что наилучший режим генерации атомарных ионов водорода  $H^-$  в ЭЦР-разряде на стенде SMIS 37 достигается при следующих условиях: мощность поддерживающего разряд СВЧ-излучения гиротрона максимальная ( $\sim 100$  kW), напуск газа в разрядную и реакторную ловушки импульсный. Максимальная плотность тока отрицательных ионов достигала  $20$  mA/cm<sup>2</sup>. Сопутствующий ток электронов в зависимости от режима превышал ионный в 50–100 раз. Для сепарации электронной фракции после системы извлечения пучка устанавливался дополнительный магнитный фильтр, обеспечивающий поперечное пучку магнитное поле с напряженностью, необходимой для отклонения электронов от трассы распространения и предотвращения их попадания в ионные диагностические системы.

Источник GISMO отличается от SMIS большей технологичностью и возможностью непрерывного режима работы. Схема установки представлена на рис. 2. Для реализации таких преимуществ в нем плазма создается с помощью непрерывного СВЧ-излучения гиротрона на частоте 28 GHz при мощности до 10 kW. Для удержания

плазмы используется магнитная ловушка, собранная из постоянных магнитов. Из-за конструкции на основе постоянных магнитов магнитная конфигурация представляет собой пробкотрон с двумя ловушками со встречными полями (или каспами) после основных пробков. Ловушка со встречными полями со стороны ввода СВЧ-излучения никак не участвует в динамике плазмы. Ловушка со встречными полями со стороны экстракции ионного пучка либо также отсекается системой экстракции и не влияет на удержание плазмы при генерации положительных ионных пучков, либо используется как вторая ступень „тандемной“ схемы при генерации отрицательных ионов, в таком случае система экстракции ионов размещается уже после нее. В остальных аспектах установка GISMO концептуально аналогична стенду SMIS.

На стенде GISMO были получены непрерывные протонные пучки с током до 130 mA при экстракции через отверстие диаметром 4 mm, что соответствует плотности тока более 1 A/cm<sup>2</sup>. Уникальным свойством таких пучков является фактически абсолютная чистота от молекулярных ионов. На установке GISMO были найдены режимы горения разряда (мощность нагрева более 2 kW, давление газа в разрядной камере  $2 \cdot 10^{-3}$  Torr), в которых достигается содержание протонов в пучке, превышающее 99.9%, а сигналы, соответствующие соотношению заряд–масса для примесей (ионов  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  и т.д.), невозможно различить на фоне шумов. Спектр ионного пучка в оптимизированном режиме представлен на рис. 3.

В случае удержания плазмы в системе из пробкотрона и каспа, т.е. при реализации „тандемной“ схемы на GISMO, при оптимизированных условиях удавалось достигать плотности тока ионов  $H^-$  до 10 mA/cm<sup>2</sup>. В данных экспериментах не был реализован независимый напуск нейтрального газа во вторую ловушку



**Рис. 3.** Состав извлекаемого ионного пучка при мощности нагрева 5 kW и давлении в разрядной камере  $2 \cdot 10^{-3}$  Torr (зависимость тока пучка, прошедшего через магнитный анализатор, от тока магнита).

„тандемной“ схемы. Это будет сделано в последующих исследованиях, так как такой подход позволял увеличивать выход отрицательных ионов на стенде SMIS.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-12-00297).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Ю.И. Бельченко, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, И.С. Емелев, А.А. Иванов, В.В. Колмогоров, С.Г. Константинов, А.А. Краснов, С.С. Попов, А.Л. Санин, А.В. Сорокин, Н.В. Ступишин, И.В. Шиховцев, А.В. Колмогоров, М.Г. Атлуханов, Г.Ф. Абдрашитов, А.Н. Драничников, В.А. Капитонов, А.А. Кондаков, УФН, **188** (6), 595 (2018). DOI: 10.3367/UFN.2018.02.038305 [Yu.I. Belchenko, V.I. Davydenko, P.P. Deichuli, I.S. Emelev, A.A. Ivanov, V.V. Kolmogorov, S.G. Konstantinov, A.A. Krasnov, S.S. Popov, A.L. Sanin, A.V. Sorokin, N.V. Stupishin, I.V. Shikhovtsev, A.V. Kolmogorov, M.G. Atlukhanov, G.F. Abdrashitov, A.N. Dranichnikov, V.A. Kapitonov, A.A. Kondakov, Phys. Usp., **61** (6), 531 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2018.02.038305].
- [2] V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, Plasma Sources Sci. Technol., **28** (7), 075015 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab2b7f

- [3] Е.И. Кузьмин, И.В. Шиховцев, Физика плазмы, **47** (6), 507 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121060111 [E.I. Kuzmin, I.V. Shikhovtsev, Plasma Phys. Rep., **47** (6), 526 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21060118].
- [4] H. Baumann, K. Bethge, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **189** (1), 107 (1981). DOI: 10.1016/0029-554x(81)90131-2
- [5] S. Peng, W. Wu, H. Ren, J. Zhang, Y. Xu, A. Zhang, T. Zhang, T. Ma, Y. Jiang, J. Sun, J. Wen, Z. Guo, J. Chen, Rev. Sci. Instrum., **90** (12), 123305 (2019). DOI: 10.1063/1.5128019
- [6] R. Gobin, P.-Y. Beauvais, K. Benmeziane, D. Bogard, G. Charruau, O. Delferrière, D. De Menezes, A. France, R. Ferdinand, Y. Gauthier, F. Harrault, J.-L. Jannin, J.-M. Lagniel, P. Mattéi, A. Sinanna, J.D. Sherman, P. Ausset, S. Bousson, D. Gardes, B. Pottin, in *Proc. of 8th Eur. Particle Accelerator Conf. (EPAC)* (Paris, France, 2002), p. 1712.
- [7] В.А. Скалыга, С.В. Голубев, И.В. Изотов, Р.Л. Лапин, С.В. Разин, А.В. Сидоров, Р.А. Шапошников, Прикладная физика, № 1, 17 (2019).
- [8] 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