

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ  
ПЛАЗМА

УДК 533.9

**ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГЕНЕРАЦИИ  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР-РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ GISMO**

© 2023 г. Р. Л. Лапин<sup>а,\*</sup>, В. А. Скалыга<sup>а</sup>, И. В. Изотов<sup>а</sup>, С. В. Голубев<sup>а</sup>,  
А. Ф. Боханов<sup>а</sup>, Е. М. Киселева<sup>а</sup>, С. С. Выбин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

\*e-mail: lapin@ipfran.ru

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

После доработки 23.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Приводятся результаты первых экспериментов по изучению объемной генерации отрицательных ионов водорода при использовании плотной газодинамической плазмы ЭЦР-разряда, который поддерживался непрерывным микроволновым излучением гиротрона (28 ГГц/5 кВт). ЭЦР водородный разряд зажигался в вакуумной камере, помещенной в магнитное поле, создаваемое системой из двух последовательно соединенных магнитных ловушек. Была проведена оптимизация параметров системы с целью получения максимальной средней плотности тока отрицательных ионов  $j = 25$  мА/см<sup>2</sup>. Определена область генерации отрицательных ионов, измерены зависимости плотности их тока от давления газа и мощности микроволнового излучения, показана перспективность дальнейшей оптимизации по напряжению экстракции.

*Ключевые слова:* микроволновое излучение гиротрона, ЭЦР-разряд в водороде в магнитном поле, объемная генерация отрицательных ионов водорода

DOI: 10.31857/S036729212260090X, EDN: NWUITG

**ВВЕДЕНИЕ**

Источники отрицательных ионов водорода (H<sup>-</sup>) требуются для обеспечения работы ускорителей, например, для инъекции ионных пучков в циклотроны и накопительные кольца, и в качестве составной части инжекторов нейтрального пучка для дополнительного нагрева плазмы в термоядерных установках [1, 2]. Источники ионов H<sup>-</sup> делятся на два типа: с объемной генерацией ионов в плазме и с поверхностной генерацией при взаимодействии плазмы с веществом с малой работой выхода, при этом, как правило, для этого на поверхность, ограничивающую плазменный объем, напыляется цезий. Источники второго типа демонстрируют большие плотности тока ионного пучка, однако обладают существенными недостатками ввиду наличия жестких требований по однородности, толщине и температуре цезиевого слоя. Источники первого типа с объемной генерацией отрицательных ионов водорода в свою очередь характеризуются возможностью стабильной работы, легкостью настройки и простотой использования.

Для реализации источника H<sup>-</sup> ионов ранее был предложен концепт тандемной схемы [3], со-

стоящей из двух частей. Первая часть — источник водородной плазмы, в котором происходит генерация возбужденных молекул водорода в результате электронного удара, вторая часть — область генерации отрицательных ионов за счет диссоциативного электронного прилипания. В этих двух частях реализуются указанные выше две стадии объемного механизма генерации ионов H<sup>-</sup>, на каждой из которых требуется наличие электронной фракции определенной температуры. Для возбуждения высоких (уровни 4–11) колебательных состояний молекулы водорода предпочтительны электроны с температурой  $T \approx 30–100$  эВ, а для механизма диссоциативного электронного прилипания оптимальной является температура электронов  $T \approx 1$  эВ [1].

В данной работе в качестве первой ступени тандемной схемы предлагается использовать электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) разряд, поддерживаемый микроволновым (СВЧ) излучением гиротрона. Ранее были проведены зондовые измерения по исследованию режимов горения подобного ЭЦР-разряда, в которых были определены диапазоны варьирования параметров плазмы. В зависимости от давления в разряде и вкладываемой мощности концентрация плазмы

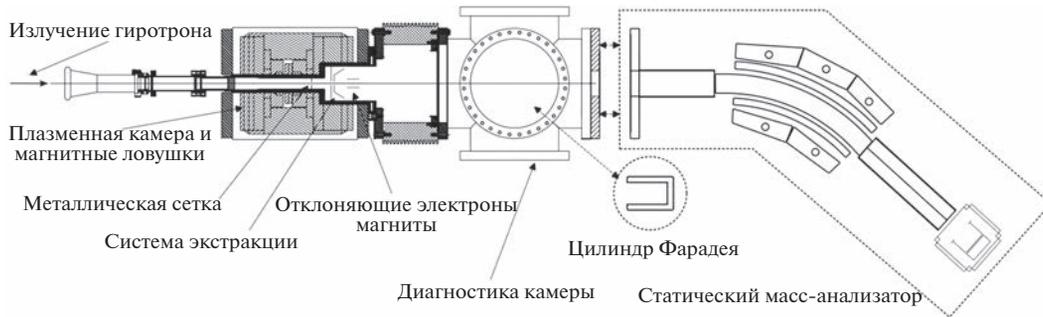


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

может находиться в пределах от  $10^{12}$  до  $10^{13}$   $\text{см}^{-3}$ , а температура основной электронной компоненты — от 5 до 50 эВ, что позволяет получить оптимальную для первой стадии объемной генерации ионов  $\text{H}^-$  температуру электронов  $T$  вплоть до 100 эВ и создать плазму высокой плотности, что должно обеспечить требуемый поток возбужденных молекул. Ранее нами на базе квазигазодинамической плазмы импульсного ЭЦР-разряда были получены пучки отрицательных ионов водорода с плотностью тока до  $80 \text{ мА/см}^2$  — на уровне источников с поверхностной генерацией ионов  $\text{H}^-$  [4], — и теоретически показана перспективность создания источника отрицательных ионов водорода на базе непрерывного ЭЦР-разряда [5–7].

В настоящей работе приводятся первые результаты экспериментального исследования объемной генерации отрицательных ионов водорода при использовании непрерывного ЭЦР-разряда, поддерживаемого СВЧ-излучением гиротрона 28 ГГц мощностью 5 кВт, на установке GISMO (ИПФ РАН).

#### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная схема представлена на рис. 1. Водородный разряд поддерживался непрерывным микроволновым излучением гиротрона с частотой 28 ГГц и мощностью до 5 кВт в магнитной системе, состоящей из двух последовательно соединенных магнитных ловушек: пробкотроне и каспе (см. рис. 2). СВЧ-излучение подавалось в первую камеру, где выполнялись условия электронного циклотронного резонанса и создавалась плазма с высокоэнергичной (30–100 эВ) электронной фракцией. Затем плотный поток плазмы и колебательно возбужденные молекулы перетекали во вторую ловушку через металлическую сетку, препятствующую дальнейшему распространению СВЧ-излучения, где высокоэнергичные электроны теряют свою энергию в результате столкновений с нейтральными молекулами газа, приводя к дальнейшей ионизации и возбужде-

нию. Описанная конфигурация позволяет разделить области генерации высокоэнергичных (“горячих”) и низкоэнергичных (“холодных”, с характерной энергией несколько эВ) электронов — первую и вторую ловушки соответственно. В свою очередь, “холодные” электроны диссоциативно прилипают к колебательно возбужденным молекулам, в результате чего генерируются искомые отрицательные ионы водорода.

Экстракция ионов  $\text{H}^-$  осуществлялась двух-электродной системой, состоящей из эмиссионного (плазменного) и ускоряющего (пуллер) электродов разных апертур. Положение системы экстракции и взаимное расположение электродов (межэлектродное расстояние) было возможно варьировать. В данной серии экспериментов использовались плазменный электрод с апертурой 1.8 мм и пуллеры с апертурами 3 и 10 мм. Для отделения пучка отрицательных ионов от электронов использовалась система постоянных неодимовых магнитов. Давление нейтрального газа измерялось в области его напуска — фронтального по отношению к СВЧ-излучению торца плазменной камеры — с помощью вакуумметра CVM-201 Super Bee.

В качестве методов диагностики и экспериментального исследования экстрагируемого пучка использовались отдельный водоохлаждаемый цилиндр Фарадея апертурой 6 см, устанавливаемый в центр диагностической камеры, и магнито-статический масс-анализатор на основе поворотного электромагнита, разделяющий извлекаемый ионный пучок по отношению заряда к массе. На входе пучка цилиндр Фарадея оснащен защитным электродом, на который подается напряжение  $-100 \text{ В}$ . Данный электрод позволяет проводить корректные измерения тока ионного пучка, подавляя влияние вторичной электронной эмиссии с внутренней поверхности цилиндра из-за ее бомбардировки. Магнито-статический масс-анализатор обладает разрешающей способностью на уровне 10 и динамическим диапазоном по отношению заряда к массе от  $1/12$  до 1 при характерных значениях напряжения экстракции

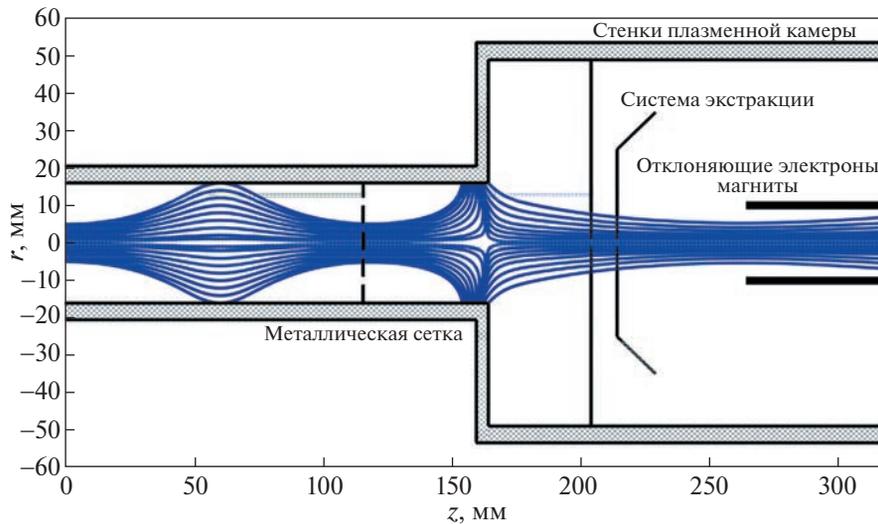


Рис. 2. Структура силовых линий магнитного поля экспериментальной установки.

(20–40) кВ и способен работать с токами ионных пучков, начиная с единиц мкА. Масс-анализатор присоединялся к дальнему (к правому на рис. 1) по отношению к падению СВЧ-излучения фланцу диагностической камеры. Последний позволял гарантировать чистоту исследуемого пучка, отбирая по соотношению заряда к массе искомые отрицательные ионы водорода.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения генерации отрицательных ионов водорода по описанной выше экспериментальной схеме важным фактором является выбор оптимальной системы экстракции. В качестве первого шага нашего исследования было проведено сравнение двух систем экстракции, которые для удобства были обозначены следующим образом: апертура плазменного электрода – межэлектродное расстояние – апертура пуллера. Использовались пуллеры с апертурой 10 и 3 мм с соответствующим межэлектродным расстоянием 7 и 3 мм. Таким образом, в данной части представленного исследования использовались системы экстракции 1.8–7–10 и 1.8–3–3. Важно отметить, что на данном этапе исследования положение системы экстракции как целого было зафиксировано: плазменный электрод располагался в широкой части плазменной камеры на расстоянии 40 мм от расширения (см. рис. 2).

Сравнение систем экстракции имеет смысл проводить при оптимальных (по плотности тока отрицательных ионов водорода) значениях других параметров системы. Поэтому были экспериментально определены оптимальные давление напускаемого нейтрального газа  $p \approx 3$  мТорр и мощность СВЧ-излучения  $P_{gr} = 4.9$  кВт (макси-

мальная из используемых) – см., например, рис. 3 и рис. 4 (системы экстракции 1.8–7–10 и 1.8–3–3 соответственно, измерения проведены с помощью цилиндра Фарадея, плотность тока оценивалась как средняя плотность – отношение извлеченного тока к площади апертуры плазменного электрода, принятой равной  $2.54 \text{ мм}^2$ ).

Затем при найденных оптимальных значениях параметров системы были проведены измерения зависимости плотности тока ионов  $\text{H}^-$  от напряжения экстракции (т.е. вольт-амперная характеристика). Ее результаты представлены на рис. 5а и 5б для систем экстракции 1.8–7–10 и 1.8–3–3 соответственно. Для обеих из рассматриваемых конфигураций зависимость плотности тока отрицательных ионов на цилиндр Фарадея от напря-

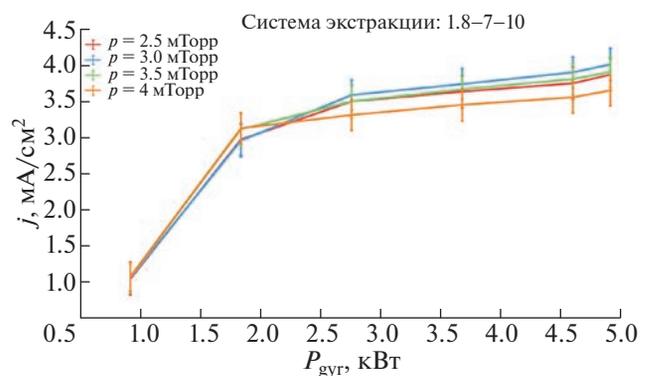
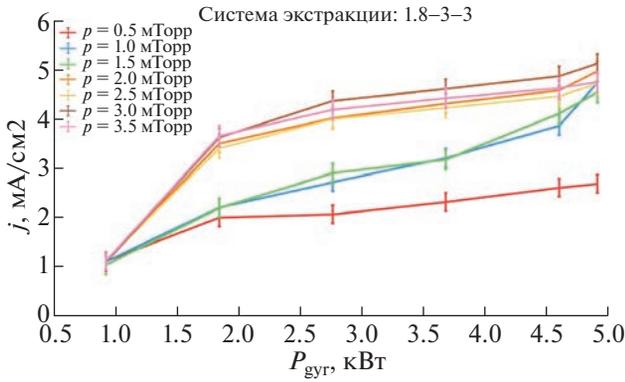


Рис. 3. Зависимость плотности тока отрицательных ионов водорода на цилиндр Фарадея от мощности падающего СВЧ-излучения при различных значениях давления нейтрального газа для системы экстракции 1.8–7–10.

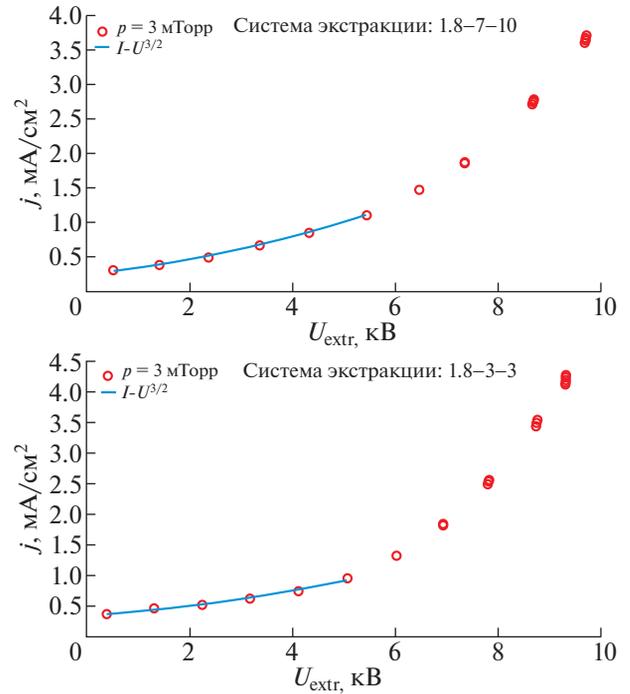


**Рис. 4.** Зависимость плотности тока отрицательных ионов водорода на цилиндр Фарадея от мощности падающего СВЧ-излучения при различных значениях давления нейтрального газа для системы экстракции 1.8–3–3.

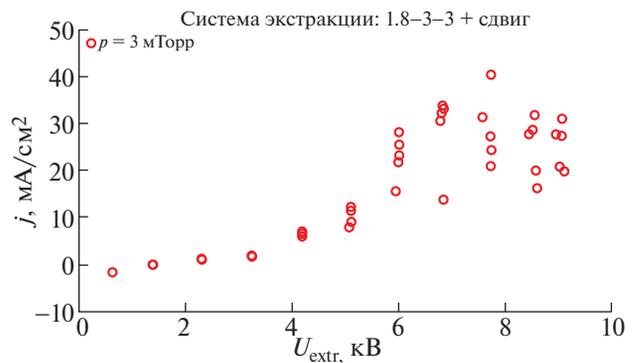
жения экстракции имела одинаковый вид, несмотря на существенное увеличение величины электрического поля в межэлектродном пространстве. Кроме того, в обоих случаях отсутствует выход тока на насыщение с ростом напряжения, т.е. часть пучка теряется в системе формирования из-за его большой расходимости. В дальнейшем использовалась конфигурация системы экстракции с большим межэлектродным электрическим полем 1.8–3–3.

Для определения и уточнения области генерации отрицательных ионов водорода система экстракции была сдвинута по направлению к каспу (т.е. влево относительно исходного положения на рис. 2). Из-за уменьшения по сравнению с исходным положением магнитного поля можно было бы ожидать уменьшение плотности тока отрицательных ионов, однако было показано (рис. 6), что плотность тока ионов  $H^-$  возросла на порядок и достигла  $j = 25$  мА/см<sup>2</sup>, выйдя на нестабильный уровень насыщения. Подобный результат означает, что таким образом система экстракции приблизилась к области, где реализуется вторая стадия объемной генерации отрицательных ионов. Соответствие найденной области генерации отрицательных ионов (т.е. второй стадии объемного механизма) зоне вблизи каспа обусловлено вылетом горячей плазмы на стенки, в результате чего после него можно ожидать наличие только фракции “холодных” электронов, получившихся в результате ионизации “горячими” электронами нейтрального газа в данной области. Таким образом, было показано, что зона эффективной генерации ионов  $H^-$  заканчивается не далее чем в 20 мм от плоскости расширения плазменной камеры (см. рис. 2).

Естественным продолжением представленных в данной статье экспериментов будут дальнейшие



**Рис. 5.** Зависимость плотности тока отрицательных ионов на цилиндр Фарадея от напряжения экстракции для систем экстракции: а) 1.8–7–10; б) 1.8–3–3 при падающей СВЧ-мощности  $P_{\text{гир}} = 4.9$  кВт. В области малых напряжений построена аппроксимация  $I \sim U^{3/2}$ .



**Рис. 6.** Зависимость плотности тока отрицательных ионов на цилиндр Фарадея от напряжения экстракции для сдвинутой системы экстракции 1.8–3–3 при падающей СВЧ-мощности  $P_{\text{гир}} = 4.9$  кВт.

исследования неустойчивого режима, в котором была достигнута наивысшая плотность тока ионов  $H^-$ , наряду с оптимизацией параметров с целью максимизации параметров экстрагируемого пучка. Влияние на ток извлекаемого пучка отрицательных ионов водорода также может оказать дополнительный напуск газа в область каспа.

## ВЫВОДЫ

Было проведено экспериментальное исследование генерации отрицательных ионов водорода при использовании непрерывного ЭЦР-разряда на установке GISMO. ЭЦР-разряд поддерживался микроволновым излучением гиротрона частотой 28 ГГц и мощностью до 5 кВт, плазма удерживалась в системе из двух последовательно соединенных магнитных ловушек: пробкотроне и каспе.

Были измерены зависимости плотности тока ионов  $H^-$  от давления напускаемого нейтрального газа и мощности СВЧ-излучения, определены их оптимальные значения для достижения максимальной плотности тока отрицательных ионов водорода. Измерения были выполнены для различных конфигураций и положений системы экстракции. Была уточнена область генерации ионов  $H^-$ , в результате чего была достигнута плотность тока  $j = 41$  мА/см<sup>2</sup>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 21-12-00297.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bacal M., Sasao M., Wada M.* // J. Appl. Phys. 2021. V. 129. P. 221101. <https://doi.org/10.1063/5.0049289>
2. *Браун Я.* Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998.
3. *Leung K.N., Ehlers K.W., Bacal M.* // Rev. Sci. Instrum. 1983. V. 54. P. 56. <https://doi.org/10.1063/1.1137215>
4. *Lapin R.L., Skalyga V.A., Izotov I.V., Golubev S.V., Razin S.V., Bokhanov A.F., Kazakov M.Yu., Shaposhnikov R.A., Kiseleva E.M., Tarvainen O.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1647. P. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012012>
5. *Lapin R.L., Izotov I.V., Skalyga V.A., Razin S.V., Shaposhnikov R.A., Tarvainen O.* // JINST. 2018. V. 13. P. C12007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/12/C12007>
6. *Dougar-Jabon V.D., Chacon Velasco A.J., Vivas F.A.* // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 950. <https://doi.org/10.1063/1.1148618>
7. *Dougar-Jabon V.D.* // Phys. Scr. 2001. V. 63. № 4. P. 322. <https://doi.org/10.1238/Physica.Regular.063a00322>