



УДК 537.5

DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-216-225

Увеличение производительности ЭЦР источника отрицательных водородных ионов с помощью дополнительных эмиттеров низкотемпературных электронов

В. Д. Дугар-Жабон*, В. И. Каряка†, А. Я. Терлецкий†

* *Индустриальный университет Сантандера
АА 678 Букараманга, Колумбия*

† *Институт физических исследований и технологий
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

Анализ механизмов образования отрицательных водородных ионов в источнике плазмы, работающем на электронном циклотронном резонансе, позволяет сделать вывод о принципиально важной роли, которую играют в этом процессе низкотемпературные электроны. В источниках такого типа получение отрицательных ионов происходит следующим образом. Вначале молекулы водорода, сталкиваясь в плазме с энергичными электронами, переходят на высоковозбуждённые электронные и колебательные уровни. Далее, присоединяя электроны низких энергий, возбуждённые молекулы приобретают отрицательный заряд. Отрицательные атомарные ионы получают в результате диссоциации возбуждённых отрицательно заряженных молекул водорода. Необходимые для этого процесса электроны низких энергий получают в результате столкновений быстрых электронов плазмы с плазменными электродами. В представленных экспериментах для дополнительного увеличения числа электронов низких энергий использовалась термоэлектронная эмиссия из вольфрамовых нагревателей и керамических LaV₆ электродов, размещённых в камере источника. В экспериментах установлено, что термоэлектронная эмиссия электронов из вольфрамовых нагревателей улучшала стабильность разряда и расширяла диапазон давлений, при которых существовал разряд, существенно не изменяя величину тока отрицательных ионов. Эмиссия же электронов из LaV₆ электродов увеличивала ток отрицательных ионов из источника более чем в 3 раза.

Ключевые слова: источник отрицательных ионов, электронный циклотронный резонанс, электронная эмиссия, диссоциация, колебательное возбуждение молекул, электронное возбуждение

1. Введение

Интерес к источникам отрицательных водородных ионов вызван их широким использованием для различных научных, технических целей и особенно их применением для целей управляемого термоядерного синтеза [1]. Поток отрицательно заряженных изотопов водорода, ускоренных до высоких энергий, может быть превращён в нейтральные атомы и инжектироваться в магнитные ловушки с целью решения проблемы нагрева плазмы до термоядерных температур. Отрицательно заряженные изотопы водорода, ускоренные до высоких энергий, используются в ускорителях различного типа, в частности, для получения радиоизотопов. Существенным преимуществом источников ионов, используемых для создания плазмы электронным циклотронным резонансом (ЭЦР), является отсутствие загрязнений плазмы материалом катода и их долговечность. Для ЭЦР источников отрицательных ионов водорода принципиально важной реакцией является присоединение низкоэнергетичных электронов к молекулам водорода с последующей диссоциацией отрицательно заряженных молекул [2]. Однако константа скорости такого процесса слишком мала для того, чтобы этот процесс использовать для практических целей. Но если молекулы водорода находятся в

сильно возбуждённом электронном или колебательном состоянии, то константа скорости процесса возрастает на много порядков. В ЭЦР источниках отрицательных ионов колебательное и электронное возбуждение молекул происходит в результате столкновения с энергичными электронами плазмы в активной зоне разряда. Молекулы водорода из основного состояния могут перейти на высоковозбуждённые колебательные состояния по механизму Франка–Кондона [3, 4] или на высоковозбуждённые электронные уровни [5, 6]. Было установлено, что в изучаемом ЭЦР источнике [2] отрицательные водородные ионы получают в соответствии с вышеуказанными реакциями. Магнитное поле источника зеркального типа, где ЭЦР поверхности, соответствующие основной микроволновой частоте и её гармоникам $B(\vec{r}) = mc\omega/ek$, имели однолистовую гиперболоидную форму [2, 7]. Здесь m и e — масса и заряд электрона, c — скорость света, ω — циклическая микроволновая частота, $k = 1$ соответствует основному резонансу, $k = 2, 3, 4$ — резонансные гармоники. В этих условиях формируются плазменные кольца высокоэнергичных электронов [2, 7–10]. Ускорение электронов до сверхвысоких энергий связано с явлением пространственного циклотронного авторезонанса [11, 12]. В [2] показано, в результате прямого контакта колец с электродами плазмы происходит бомбардировка электродов энергичными частицами колец и в результате вблизи электродов образуются слои низкоэнергичных электронов. Именно в этих слоях и образуются отрицательно заряженные ионы. В проведённой серии экспериментов ЭЦР источник, описанный в [2, 8], был модифицирован с целью получения более высокой степени генерации отрицательных ионов. В разрядной камере были установлены две системы, которые обогащали плазму источника дополнительными низкоэнергичными электронами.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Разрядная камера представляла собой алюминиевый цилиндр диаметром 13 см и длиной 8 см, размещённый между двумя одинаковыми SmCo_5 магнитными дисками диаметром 6 см и поверхностным магнитным полем 0,34 Тл. Оси магнитных дисков совпадали с осью разрядной камеры. Геометрия ЭЦР поверхностей и число ЭЦР однолистовых гиперболоидов определялись расстоянием между магнитными дисками, которое могло изменяться от 8,6 до 12 см. Таким образом могли меняться и радиусы плазменных колец. Сечения резонансных гиперболоидов и плазменных колец на рисунке изображены как $B_{c1}-B_{c4}$ и $k = \overline{1,4}$ соответственно. Мощность магнетрона (3) менялась в пределах 50–300 Вт на частоте 2,45 ГГц. В камере источника возбуждалась мода TE_{111} . Микроволновая мощность поступала в камеру источника через волновод и керамическое Al_2O_3 окно. Давление рабочего газа в камере поддерживалось с помощью пьезоэлектрического натекателя. Магнитное поле, соответствующее основному резонансу, равнялось 0,0875 Тл.

Для создания условий, способствующих генерации отрицательных водородных ионов, использовались два устройства. Первое устройство, которое поставляло в разряд низкоэнергичные электроны, состояло из четырёх вольфрамовых проволок длиной 8 см, обозначенных (6) на рис. 1 и 2. Эти проволоки устанавливались попарно на боковых поверхностях камеры на расстоянии 0,4 см от поверхности и были ориентированы перпендикулярно силовым линиям микроволнового электрического поля с целью минимизировать их влияние. Температура проволок поддерживалась на уровне не выше 2000 К, так как более высокая температура требовала бы дополнительных мер по отводу тепла от установки.

Второе устройство, предназначенное для получения низкоэнергичных электронов, представляло из себя дисковый эмиттер из гексаборида лантана (LaB_6) диаметром 4 мм (7), установленное на боковой стенке камеры, как показано на рис. 1 и 2. Выбор гексаборида лантана в качестве эмиттера электронов связан с небольшой работой выхода электронов (2,7 эВ), его нечувствительности к ионной бомбардировке и большому сроку службы. Тыльная сторона LaB_6 дисков нагревалась вольфрамовыми

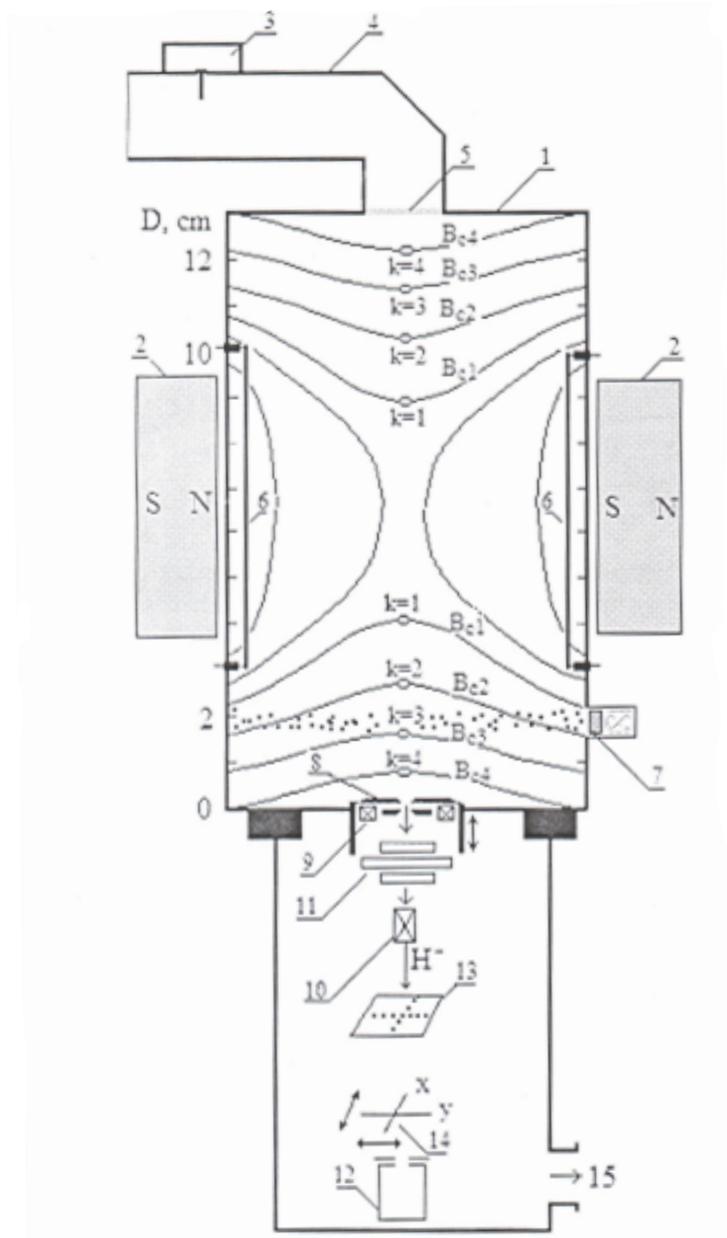


Рис. 1. Принципиальная схема ЭЦР источника ионов: 1 — разрядная камера; 2 — SmCo дисковые магниты; 3 — магнетрон; 4 — волновод; 5 — керамическое волноводное окно; 6 — вольфрамовая проволока; 7 — LaB эмиттер электронов; 8 — двухэлектродная система экстракции; 9 — корректирующие магниты; 10 — магниты, отклоняющие электроны; 11 — одиночная фокусирующая линза; 12 — цилиндр Фарадея; 13 — пластина эмиттанса; 14 — подвижная проволока; 15 — откачка; $B_{c1}-B_{c4}$ — изображение сечений резонансных гиперболоидов; $k = \overline{1,4}$ — изображение сечений резонансных колец

проволоками с помощью постоянного тока, величина которого определяла температуру поверхности LaB_6 . Вольфрамовая проволока помещалась в водоохлаждаемую трубку из нержавеющей стали длиной 1,2 см и внутренним диаметром 0,7 см.

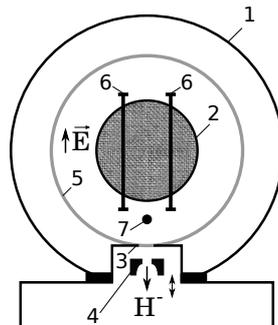


Рис. 2. Поперечное сечение камеры источника: 1 — боковая поверхность камеры; 2 — магнитные диски; 3 — электроды; 4 — электроды экстракции; 5 — плазменное кольцо; соответствующее резонансу $k = 3$; 6 — вольфрамовая проволока; 7 — LaB эмиттер электронов

Для экстракции отрицательно заряженных частиц использовалась подвижная двухэлектродная (плазменный электрод и электрод экстрактор) система (8), установленная на боковой поверхности камеры со стороны, противоположной подводу микроволновой мощности. В её состав входили корректирующие магниты (9), магниты (10), отклоняющие электроны, фокусирующие линзы (11). Экстрагированные ионы собирались с помощью цилиндра Фарадея (12). Камера и плазменный электрод были заземлены, а экстрагирующий электрод находился под потенциалом $+8$ кВ. Экстрагирующее отверстие имело диаметр 3 мм. Экстрагирующая система могла погружаться в плазму на расстояние 1,5 см. Система, предназначенная для формирования и экстракции пучка, детально описана в [2].

3. Обсуждение полученных результатов

Измерение электронной температуры и плотности плазмы показало, что между параметрами разрядной плазмы отсутствуют качественные различия в случае нагретых и не нагретых спиралей эмиссионных элементов. Как видно из рис. 3, при нагреве эмиссионных элементов расширяется диапазон давлений, при которых существует разряд в камере, увеличивается также плотность плазмы. При микроволновой мощности в 200 Вт диапазон давлений существования разряда увеличивался от (2,0–3,3) до (1,2–5,4) Па, а плотность плазмы возрастала от $1,0 \cdot 10^{11}$ до $1,2 \cdot 10^{11}$ см^{-3} . Этот эффект связан с влиянием термоэлектронов. Разряд и диапазон давлений существования разряда являлся очень стабильным, а система нагрева не влияла на температуру электронов, которая равнялась 55 ± 7 эВ.

Нагрев LaB_6 эмиттеров предназначался для обогащения области вблизи плазменных электродов (3) электронами с низкими энергиями. Термоэлектроны, полученные из LaB_6 , распространялись вдоль магнитных силовых линий, что предохраняло их от диффузии в объём, занимаемый плазмой. Плазменные электроды были погружены в плазму на глубину 1,2 см и находились в непосредственном контакте и с термоэлектронами и с плазменным кольцом, соответствующим третьей циклотронной гармонике ($k = 3$ на рис. 2). Таким образом решалась проблема увеличения низкоэнергетичных электронов в непосредственной близости от экстрагирующего отверстия.

Как отмечалось в работе [9], отрицательно заряженные водородные ионы появляются в двух принципиально важных реакциях.

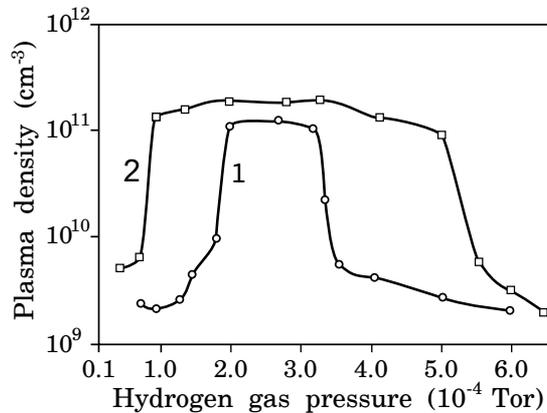
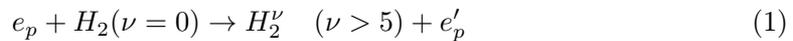
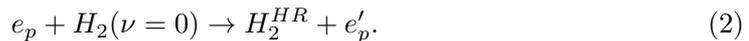


Рис. 3. Зависимость плотности плазмы от давления водорода в камере: 1 — холодные нагревательные элементы, 2 — нагретые элементы

На первой стадии вследствие электронных ударов в объёме плазмы происходит [3,4] образование высоковозбуждённых колебательных состояний молекул водорода $X^1\Sigma_g^+$

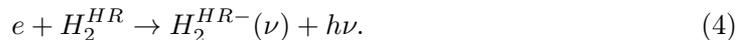


и высоковозбуждённых ридберговских электронных состояний [5, 6]:



Здесь e_p — электрон плазмы, H_2^ν — колебательно возбуждённая молекула водорода, $H_2(\nu = 0)$ — молекула в невозбуждённом колебательном состоянии $X^1\Sigma_g^+$ ($\nu = 0$), ν — колебательное квантовое число. Оптимальная температура электронов для обеих реакций около 50–60 эВ.

На второй стадии низкоэнергетические электроны присоединяются к возбуждённым молекулам:



Полученные возбуждённые отрицательно заряженные молекулы водорода нестабильны и диссоциируют на отрицательно заряженные атомы водорода H^- и возбуждённые атомы H^* :



Максимум распределения вторичных электронов, возникающих в разряде при столкновениях энергичных частиц плазмы с плазменными электродами, составлял примерно 20 эВ, что значительно превышает оптимальную энергию для реакций (3) и (4). В силу этих причин в экспериментах предполагалось, что дополнительные эмиттеры низкоэнергетичных термоэлектронов будут основными поставщиками электронов с оптимальной энергией, так как температура термоэлектронов такая же, как и температура эмиттера. Нагрев вольфрамовых термоэмиттеров (6) приводил к увеличению экстракции отрицательных ионов водорода, но оно составляло не более 5% [13]. Низкая эффективность термоэмиттеров объясняется тем, что они создавали низкоэнергетические электроны в плазменной области, удалённой от электродов

экстракции, куда поле электродов практически не проникало. Образованные отрицательные ионы разрушались горячими электронами по пути к электродам. Для улучшения условий осуществления реакций (5) в экспериментах использовались электроды из гексаборида лантана.

В экспериментах температура LaB_6 равнялась 1650 К, и средняя энергия термоэлектронов была примерно равна 0,13 эВ [14]. Возбуждённые молекулы водорода могли эффективно захватывать эти электроны, осуществляя реакцию (5).

Плотность термоэлектронов, рассчитанная для области, близкой к электроду экстракции, соответствовала $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что в 5,5 раз больше, чем плотность вторичных электронов от колец горячих электронов [2]. Экспериментальное значение тока отрицательных ионов при этих условиях равнялось 10,2 мА, что в 3,2 раза превышало значение тока при не нагретом эмиттере.

Эксперименты при вариации магнитного поля в резонаторе и изменении положения электродов экстракции показали, что на процесс образования отрицательных ионов водорода термоэлектроны эмиттера оказывали более сильное влияние, чем вторичные электроны, образующиеся при столкновениях быстрых электронов плазмы с электродами.

Сравнение полученных результатов с работами других авторов [15] свидетельствует о высокой эффективности исследованного источника отрицательных ионов как по величине тока экстракции, так и по его энергоэффективности.

4. Заключение

В работе изучалось влияние эмиттированных в плазму разряда низкоэнергетических электронов на величину тока отрицательных водородных ионов из ЭЦР источника. Показано, что установленные должным образом LaB_6 эмиттеры формировали слой низкоэнергетических электронов вблизи поверхностей плазменных электродов, что приводило к значительному увеличению производства отрицательно заряженных ионов водорода. В экспериментах продемонстрировано, что вторичные электроны, получаемые в плазменных кольцах, значительно менее эффективны для получения отрицательных ионов вследствие их сравнительно высоких энергий. Полученные результаты позволяют сделать выводы для усовершенствования существующих ЭЦР источников ионов. Механизмы работы этих источников требуют как наличия электронов высоких энергий, необходимых для ионизации плазмы и колебательного и электронного возбуждения молекул, так и низкоэнергетических электронов для диссоциативного получения отрицательных ионов. Вследствие этого большую роль играет геометрия разрядной системы, позволяющая оптимизировать эти процессы. Для дальнейшего улучшения производительности источника следует стремиться к увеличению плотности низкоэнергетических электронов вблизи поверхности плазменных электродов. Этого можно добиться как изменением геометрии источника с целью приблизить термоэмиттеры к области экстракции, так и подбором оптимального материала эмиттеров.

Как уже отмечалось, существенную роль в процессе получения отрицательных ионов водорода играет колебательное возбуждения молекул, которое увеличивает константу скорости процесса получения отрицательных ионов на много порядков. Кроме столкновительных процессов в объёме плазмы к колебательному возбуждению молекул водорода приводят также поверхностные процессы на электродах. Приведённые в [15] данные о существенной зависимости ионного тока источника от материала поверхности разрядной камеры подтверждают вывод о перспективности исследований явлений на поверхности электродов для увеличения эффективности ЭЦР источников плазмы.

Перспективным каналом колебательного возбуждения молекул H_2 является взаимодействие между водородными атомными или молекулярными ионами H_2^+ и H_3^+ на металлической поверхности плазменной камеры [16, 17]. В результате рекомбинации на поверхности атомов газовой фазы могут образовываться колебательно возбуждённые молекулы водорода $\text{H}_2(\nu'')$ [18, 19]. Экспериментальные исследования [20]

подтверждают существенный вклад поверхностных процессов на производительность источника отрицательных ионов.

Литература

1. *Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н.* Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. — М., 1986.
2. *Dougar-Jabon V. D.* Production of Hydrogen and Deuterium Negative Ions in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma // *Physica Scripta*. — 2001. — Vol. 63, No 4. — P. 322. — DOI: 10.1238/Physica.Regular.063a00322.
3. *Alan M., Wong S. F.* Effect of Vibrational and Rotational Excitation on Dissociative Attachment in Hydrogen // *Physical Review Letters*. — 1978. — Vol. 41, issue 26. — Pp. 1791–1794. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.41.1791.
4. *Wadehra J. M., Bardsley J. N.* Vibrational and Rotational-State Dependence of Dissociative Attachment in e -H₂ Collisions // *Physical Review Letters*. — 1978. — Vol. 41, issue 26. — Pp. 1795–1798. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.41.1795.
5. *Pinnaduwage L. A., Christophorou L. G.* H⁻ Formation in Laser-Excited Molecular Hydrogen // *Physical Review Letters*. — 1993. — Vol. 70, issue 6. — Pp. 754–757. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.70.754.
6. *Datscos P. G., Pinnaduwage L. A., Kielkopf J. F.* Electron Attachment to Photofragments and Rydberg States in Laser-Irradiated CCl₂F₂ // *Journal of Applied Physics*. — 1998. — Vol. 84, issue 7. — P. 3442. — DOI: 10.1063/1.368518.
7. *Dougar-Jabon V. D., Reznikov D. V., Santos Mayorga R.* Influence of an Electron-Beam Injection on Ions Charge State Distribution in an ECR Source at 2.4 GHz // *Proc. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*. — 1991.
8. *Dougar-Jabon V. D., Chacon Velasco A. J., Vivas F. A.* Hydrogen Negative Ion Production in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma // *Review of Scientific Instruments*. — 1998. — Vol. 69, issue 2. — P. 950. — DOI: 10.1063/1.1148618.
9. *Dougar-Jabon V. D.* X-ray Source Based on Electron Cyclotron Resonance Discharge in a Magnetic Mirror Trap // *Physica Scripta*. — 2004. — Vol. 69, No 4. — P. 313. — DOI: 10.1238/Physica.Regular.069a00313.
10. Shell Structure of a Hot-Electron Plasma / *H. Ikegami, M. Ikezi, S. Tanaka, K. Takayama* // *Physical Review Letters*. — 1967. — Vol. 19. — P. 778. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.19.778.
11. *Dugar-Zhabon V., Oronzco E.* Cyclotron Spatial Autoresonance Acceleration Model // *Physical Review Accelerators and Beams*. — 2009. — Vol. 12, issue 4. — P. 041301. — DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.041301.
12. *Dugar-Zhabon V., Oronzco E.* Three-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Spatial Autoresonance Electron-Beam Motion // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2010. — Vol. 38, issue 10. — Pp. 2980–2984. — DOI: 10.1109/TPS.2010.2060362.
13. *Дугар-Жабон В. Д., Каряка В. И.* Увеличение потока отрицательных водородных ионов из ЭЦР источника плазмы с помощью низкотемпературных электронов // LI Всероссийская конф. по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. — М.: 2015. — С. 233.
14. *Дугар-Жабон В. Д., Каряка В. И.* Улучшение производительности ЭЦР источника отрицательных водородных ионов с помощью дополнительных эмиттеров низкотемпературных электронов // LII Всероссийская конф. по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. — М.: 2016. — С. 170.
15. *Tarvainen O., Peng S. X.* Radiofrequency and 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance H⁻ Volume Production Ion Sources // *New Journal of Physics*. — 2016. — Vol. 18, No 10. — P. 105008. — DOI: 10.1088/1367-2630/18/10/105008.
16. *Bacal M., Wada M.* Negative Hydrogen Ion Production Mechanisms // *Applied Physics Reviews*. — 2015. — Vol. 2, No 2. — P. 021305. — DOI: 10.1063/1.4921298.

17. *Hiskes J. R., Karo A. M.* Recombination and Dissociation of H_2^+ and H_3^+ Ions on Surfaces to Form $H_2(\nu')$: Negative Ion Formation on Low-Work-Function Surfaces // *Journal of Applied Physics*. — 1990. — Vol. 67, No 11. — Pp. 6621–6632. — DOI: 10.1063/1.345095.
18. *Capitelli M., Bruno D., Laricchiuta A.* Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics Transport. — New York: Springer, 2016. — DOI: 10.1007/978-1-4419-8185-1.
19. Vibrational Excitation of Hydrogen via Recombinative Desorption of Atomic Hydrogen Gas on a Metal Surface / R. I. Hall, I. Čadež, M. Landau et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 1988. — Vol. 60, No 4. — Pp. 337–340. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.337.
20. *An Y., Cho W., Chung K.* Wave Frequency Dependence of H^- Ion Production and Extraction in a Transformer Coupled Plasma H^- Ion Source at SNU // *Review of Scientific Instruments*. — 2012. — Vol. 83, No 2. — P. 02A727. — DOI: 10.1063/1.3678659.

UDC 537.5

DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-216-225

The Increase of Negative Hydrogen Ions Production in ECR Source by use of the Additional Low-Temperature Emitters of Electrons

V. D. Dugar-Jabon*, V. I. Karyaka[†], A. Ya. Terletsy[†]

* *Industrial University of Santander*
AA 678 Bucaramanga, Colombia

[†] *Institute of Physical Research and Technologies*
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN university)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Analysis of the mechanisms of formation of negative hydrogen ions in the plasma source, operating at the electron cyclotron resonance, leads to the conclusion about the fundamentally important role played in this process by low-temperature electrons. In the source the negative ion production is realized in two stages. First, hydrogen molecules colliding in a plasma with energetic electrons, are excited to high-lying Rydberg electron states and to high vibration levels in the plasma volume. Further, pulling the low-energy electrons, excited molecules acquire a negative charge. Negative atomic ions result from dissociation of excited negatively charged hydrogen molecules. Necessary for this process, the electrons of low energies are the result of collisions of fast plasma electrons with plasma electrodes. In the presented experiments to further increase the number of low-energy electrons were used electrons, emitted from the heated tungsten filaments and ceramic electrodes LaB_6 placed in the chamber of the source. The experiments found that emission of electrons from tungsten heaters have improved stability of the discharge and expanded the range of pressure under which there was a discharge, without changing substantially the magnitude of current of negative ions. The emission of electrons from the LaB_6 electrodes increased the current of negative ions from a source more than 3 times.

Key words and phrases: source of negative ions, electron cyclotron resonance, electron emission, dissociation, vibrational excitation of molecules, electronic excitation

References

1. M. D. Gabovich, N. V. Pleshivtsev, N. N. Semashko, *Beams of Ions and Atoms for Connection of Thermonuclear Fusion and Technological Purposes*, Moscow, 1986, in Russian.
2. V. D. Dugar-Jabon, Production of Hydrogen and Deuterium Negative Ions in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma, *Physica Scripta* 63 (4) (2001) 322. doi:10.1238/Physica.Regular.063a00322.
3. M. Alan, S. F. Wong, Effect of Vibrational and Rotational Excitation on Dissociative Attachment in Hydrogen, *Physical Review Letters* 41 (1978) 1791–1794. doi:10.1103/PhysRevLett.41.1791.

4. J. M. Wadehra, J. N. Bardsley, Vibrational and Rotational-State Dependence of Dissociative Attachment in e - H_2 Collisions, *Physical Review Letters* 41 (1978) 1795–1798. doi:10.1103/PhysRevLett.41.1795.
5. L. A. Pinnaduwege, L. G. Christophorou, H^- Formation in Laser-Excited Molecular Hydrogen, *Physical Review Letters* 70 (1993) 754–757. doi:10.1103/PhysRevLett.70.754.
6. P. G. Datscos, L. A. Pinnaduwege, J. F. Kielkopf, Electron Attachment to Photofragments and Rydberg States in Laser-Irradiated CCl_2F_2 , *Journal of Applied Physics* 84 (1998) 3442. doi:10.1063/1.368518.
7. V. D. Dougar-Jabon, D. V. Reznikov, R. Santos Mayorga, Influence of an Electron-Beam Injection on Ions Charge State Distribution in an ECR Source at 2.4 GHz, in: *Proc. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*, 1991.
8. V. D. Dougar-Jabon, A. J. Chacon Velasco, F. A. Vivas, Hydrogen Negative Ion Production in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma, *Review of Scientific Instruments* 69 (1998) 950. doi:10.1063/1.1148618.
9. V. D. Dougar-Jabon, X-ray Source Based on Electron Cyclotron Resonance Discharge in a Magnetic Mirror Trap, *Physica Scripta* 69 (4) (2004) 313. doi:10.1238/Physica.Regular.069a00313.
10. H. Ikegami, M. Ikezi, S. Tanaka, K. Takayama, Shell Structure of a Hot-Electron Plasma, *Physical Review Letters* 19 (1967) 778. doi:10.1103/PhysRevLett.19.778.
11. V. Dugar-Zhabon, E. Oronzco, Cyclotron Spatial Autoresonance Acceleration Model, *Physical Review Accelerators and Beams* 12 (2009) 041301. doi:10.1103/PhysRevSTAB.12.041301.
12. V. Dugar-Zhabon, E. Oronzco, Three-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Spatial Autoresonance Electron-Beam Motion, *IEEE Transactions on Plasma Science* 38 (2010) 2980–2984. doi:10.1109/TPS.2010.2060362.
13. V. Dugar-Zhabon, V. I. Karyaka, An Increase in the Flux of Negative Hydrogen Ions from the ECR of the Plasma Source by Means of Low-Temperature Electrons, in: *LI All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics*, Moscow, 2015, p. 233, in Russian.
14. V. Dugar-Zhabon, V. I. Karyaka, Improving the Productivity of an ECR Source of Negative Hydrogen Ions by Means of Additional Emitters of Low-Temperature Electrons, in: *LII All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics*, Moscow, 2016, p. 170, in Russian.
15. O. Tarvainen, S. X. Peng, Radiofrequency and 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance H^- Volume Production Ion Sources, *New Journal of Physics* 18 (10) (2016) 105008. doi:10.1088/1367-2630/18/10/105008.
16. M. Bacal, M. Wada, Negative Hydrogen Ion Production Mechanisms, *Applied Physics Reviews* 2 (2) (2015) 021305. doi:10.1063/1.4921298.
17. J. R. Hiskes, A. M. Karo, Recombination and Dissociation of H_2^+ and H_3^+ Ions on Surfaces to Form $H_2(\nu')$: Negative Ion Formation on Low-Work-Function Surfaces, *Journal of Applied Physics* 67 (11) (1990) 6621–6632. doi:10.1063/1.345095.
18. M. Capitelli, D. Bruno, A. Laricchiuta, *Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics Transport*, Springer, New York, 2016. doi:10.1007/978-1-4419-8185-1.
19. R. I. Hall, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou, S. C., Vibrational Excitation of Hydrogen via Recombinative Desorption of Atomic Hydrogen Gas on a Metal Surface, *Phys. Rev. Lett.* 60 (4) (1988) 337–340. doi:10.1103/PhysRevLett.60.337.
20. Y. An, W. Cho, K. Chung, Wave Frequency Dependence of H^- Ion Production and Extraction in a Transformer Coupled Plasma H^- Ion Source at SNU, *Review of Scientific Instruments* 83 (2) (2012) 02A727. doi:10.1063/1.3678659.

Для цитирования:

Дугар-Жабон В. Д., Каряка В. И., Терлецкий А. Я. Увеличение производительности ЭЦР источника отрицательных водородных ионов с помощью дополнительных эмиттеров низкотемпературных электронов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика. Информатика. Физика. — 2018. — Т. 26, № 3. — С. 216–225. — DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-216-225.

For citation:

Dugar-Jabon V. D., Karyaka V. I., Terletsky A. Ya. The Increase of Negative Hydrogen Ions Production in ECR Source by use of the Additional Low-Temperature Emitters of Electrons, RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics 26 (3) (2018) 216–225. DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-216-225. In Russian.

Сведения об авторах:

Дугар-Жабон Валерий Дондокович — профессор, кандидат физико-математических наук, профессор Индустриального университета Сантандер (e-mail: vdougar@uis.edu.co, тел.: +7 (903) 5557774)

Каряка Владимир Иванович — доцент, кандидат физико-математических наук, доцент Института физических исследований и технологий РУДН (e-mail: volkar2@mail.ru, тел.: +7(916) 9941426)

Терлецкий Александр Яковлевич — доцент, кандидат физико-математических наук, доцент Института физических исследований и технологий РУДН (e-mail: veselovich50@mail.ru, тел.: +7(916) 4630628)

Information about the authors:

Dugar-Jabon V. D. — Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Industrial University of Santander (e-mail: vdougar@uis.edu.co, phone: +7 (903) 5557774)

Karyaka V. I. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Institute of Physical Researches and Technologies of Peoples' Friendship University of Russia (RUDN university) (e-mail: volkar2@mail.ru, phone: +7(916) 9941426)

Terletsky A. Ya. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Institute of Physical Researches and Technologies of Peoples' Friendship University of Russia (RUDN university) (e-mail: veselovich50@mail.ru, phone: +7(916) 4630628)