

Влияние параметров разряда на генерацию ионов H_3^+ в источнике на основе отражательного разряда с полым катодом

© А.В. Визирь,¹ Е.М. Окс,^{1,2} М.В. Шандриков,¹ Г.Ю. Юшков¹

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия
e-mail: vizir@opee.hcei.tsc.ru

Для источника ионов водорода на основе отражательного разряда с полым катодом проведены исследования влияния тока разряда и давления газа на компонентный состав ионного пучка. Показано, что оптимизация параметров разряда обеспечивает возможность достижения в пучке до 70% ионов трехатомного водорода H_3^+ .

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44238.1877

Введение

Пучки ионов водорода, главным образом протонные пучки, находят применение в установках управляемого термоядерного синтеза, ускорителях для медицины, для модификации поверхности различных материалов, а также в ряде других устройств и технологий. Для генерации таких пучков наиболее часто используют ионные источники типа дуоплазматрон [1]. Помимо дуоплазматронов ионы водорода получают в источниках на основе разрядных систем с осцилляцией электронов (разряды в скрещенных $E \times H$ полях и разряд с полым катодом [2]). Эти системы, как и ряд дуоплазматронов, функционируют с ненакаливаемым до термоэмиссионных температур „холодным“ катодом. Преимущества разрядных систем с холодным катодом связаны с увеличением срока службы катода, повышением газовой эффективности, снижением энергоемкости, увеличением эмиссионной способности источников.

В качестве рабочего плазмообразующего газа в источниках ионов водорода применяется молекулярный водород. При этом в составе пучка регистрируются протоны H^+ , ионы молекулярного водорода H_2^+ , а также на первый взгляд экзотические ионы трехатомного водорода H_3^+ , которые иногда называют „хайзонами“ [3]. Поскольку из состава ионного пучка наиболее востребованными являются протоны, то проводимые исследования источников ионов водорода были направлены прежде всего на достижение в пучке максимальной доли протонов. Так, например, в работах [4–6] для дуоплазматрона с холодным магнетронным катодом показано, что процентное содержание протонов в пучке может достигать 75–85%. Условия, обеспечивающие в составе ионного пучка превалирование ионного компонента H_3^+ , исследованы недостаточно. Получение трехатомных ионов водорода и изучение их физических свойств может представлять интерес, например, в области физики и эволюции звезд и межзвездной среды, поскольку их излучательные, рекомбинационные и другие свойства

влияют на процессы, изучаемые молекулярной астрофизикой и межзвездной химией [7].

Ранее нами был создан источник низкоэнергетичных стационарных ионных пучков на основе отражательного разряда с полым катодом, обеспечивающий эффективное функционирование в области минимальных давлений уровня $\sim 10^{-5}$ Торр [8]. В сильноточном импульсном режиме при работе на водороде источник обеспечивал генерацию всех трех возможных компонентов ионного пучка. В определенных режимах горения разряда в ионном пучке регистрировалась значительная доля хайзонов [9]. Полученные результаты стимулировали постановку специальных исследований влияния параметров разряда (тока разряда и давления газа) на состав водородной плазмы разрядной системы ионного источника, а следовательно, и на компонентный состав извлеченного из этой плазмы ионного пучка. При этом основное внимание уделялось определению условий, обеспечивающих эффективную генерацию ионов H_3^+ . Результаты проведенных исследований представлены в настоящей работе.

Экспериментальная установка

Электродная схема экспериментального макета ионного источника ионов водорода показана на рис. 1. Для генерации ионно-эмиссионной плазмы в источнике используется отражательный разряд в скрещенных $E \times H$ полях с полым катодом. Разряд функционирует с полым 1 и плоским 2 катодами. Диаметр полости и его длина составляют 4 и 30 мм соответственно. В полость напускается рабочий газ (водород). Анод 3 представляет собой полый цилиндр с внутренним диаметром 20 мм и длиной 7 мм. В плоском катоде 2 выполнено эмиссионное отверстие диаметром 2 мм. Электроды разрядной системы источника изготовлены из нержавеющей стали и охлаждаются проточной водой. Аксиально-симметричное магнитное поле (уровня ~ 0.1 Т) создается кольцевым постоян-

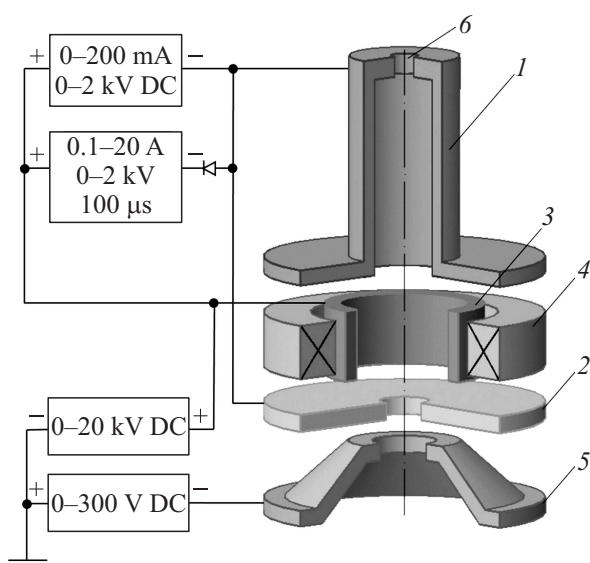


Рис. 1. Источник ионов водорода: 1 — полый катод, 2 — плоский отражательный катод, 3 — анод, 4 — постоянный магнит, 5 — ускоряюще-запирающий электрод, 6 — отверстие для напуска газа.

ным самарий-кобальтовым магнитом 4, намагниченным в осевом направлении. В экспериментах ток разряда в стационарном режиме регулировался в пределах от сотен микроампер до сотен миллиампер. Для более высоких значений тока (до 20 А) разряд реализовывался в импульсном режиме с длительностью импульса $100 \mu s$ и частотой повторений импульсов 5 Hz. При используемых в эксперименте параметрах импульса разряд функционирует в так называемом квазистационарном режиме горения, параметры и характеристики которого практически не отличаются от стационарного режима. Это позволяет достаточно легко объединить экспериментальные зависимости от тока разряда на границе непрерывного и импульсного режимов.

Ускоряющее ионы напряжение (до 15 кВ) приложено между анодом 3 и электродом 5 с центральным отверстием 3 мм. Для отсечки вторичных электронов электрод 5 был смещен относительно заземленной вакуумной камеры на потенциал -300 В . Остаточное давление в вакуумной камере составляло $2 \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$. Давление газа в области формирования и транспортировки ионного пучка варьировалось изменением расхода напускаемого в катодную полость водорода в пределах $1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$. При этом из-за протекания потока газа через малое эмиссионное отверстие в плоском катоде давление газа в разрядном промежутке было выше, по крайней мере, на два порядка величины.

Состав ионного пучка, извлеченного из плазмы разряда, измерялся время-пролетным спектрометром. Конструктивная схема, принцип действия и параметры спектрометра подробно описаны в [10]. Пролетная база спектрометра составляет 1.2 м. При этом для измере-

ния малых токов ионных компонентов вместо цилиндра Фарадея в спектрометре использовался вторичный электронный умножитель ВЭУ-7М, работающий в аналоговом режиме. Это по сравнению с [9] позволило существенно расширить диапазон исследуемых величин тока разряда в область меньших значений. В отличие от цилиндра Фарадея ВЭУ регистрирует не только ионы, но и нейтральные ускоренные частицы, образовавшиеся в пространстве дрейфа ионного пучка в результате перезарядки ионов. Поэтому измерения с помощью ВЭУ более точно отражают именно ионный состав плазмы в разрядной системе ионного источника. Поскольку диапазон исследуемых токов разряда охватывал более 4 порядков величины, система извлечения пучка не оптимизировалась под какой-либо конкретный ток. Поэтому данные по общему току пучка приведены лишь как справочные величины, а подтверждением наличия ускоренного ионного пучка является время-пролетный спектр для каждого из исследуемых условий горения разряда.

Результаты экспериментов и обсуждение

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) отражательного разряда с полым катодом при различных давлениях водорода приведены на рис. 2. Явно виден переход разряда в режим горения с полым катодом (или возникновение эффекта полого катода), сопровождающийся резким снижением напряжения горения разряда. Пороговый ток перехода существенно уменьшается при повышении давления газа. При развитом эффекте полого катода доля разрядного тока на полый катод составляла приблизительно 30% от полного тока и в диапазоне исследуемых токов разряда и давлений газа это отношение оставалось практически неизменным. Также обращает на себя внимание заметный рост напряжения горения разряда в области минимальных давлений при токах более 1 А.

При ускоряющем напряжении 15 кВ и токе разряда 100 мА полный ток ионного пучка составлял 1 мА. Такое отношение тока ионного пучка к току разряда сохранялось во всем исследуемом диапазоне токов разряда.

Осциллограммы сигналов с выхода время-пролетного спектрометра представлены на рис. 3. В извлеченном из плазмы токе ионного пучка присутствуют все возможные компоненты ионов водорода: H^+ , H_2^+ и H_3^+ . Как уже было ранее показано в [9], в зависимости от условий горения и параметров разряда (в данном случае в зависимости от тока разряда) в ионном пучке может доминировать любой из его возможных компонентов.

Влияние давления газа на состав ионного пучка иллюстрируется зависимостями, представленными на рис. 4. Повышение давления приводит к практически пропорциональному повышению в ионном пучке доли хайзонов

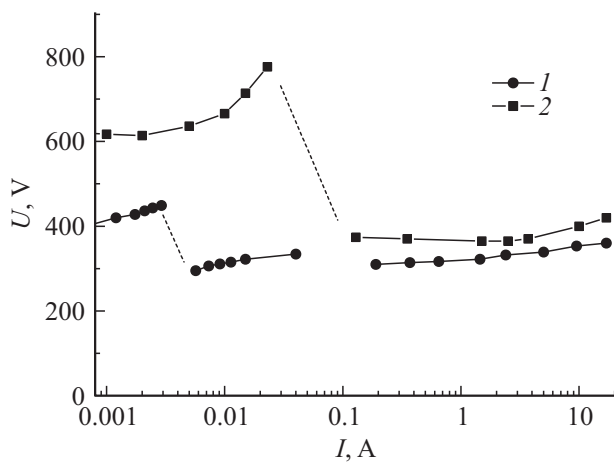


Рис. 2. ВАХ отражательного разряда с полым катодом. Водород. 1 — давление $1.8 \cdot 10^{-5}$ Торг, стационарный режим 0.5–23 мА, квазистационарный режим 0.13–17 А; 2 — $2 \cdot 10^{-4}$ Торг, стационарный режим 0.5–40 мА, квазистационарный режим 0.19–17 А.

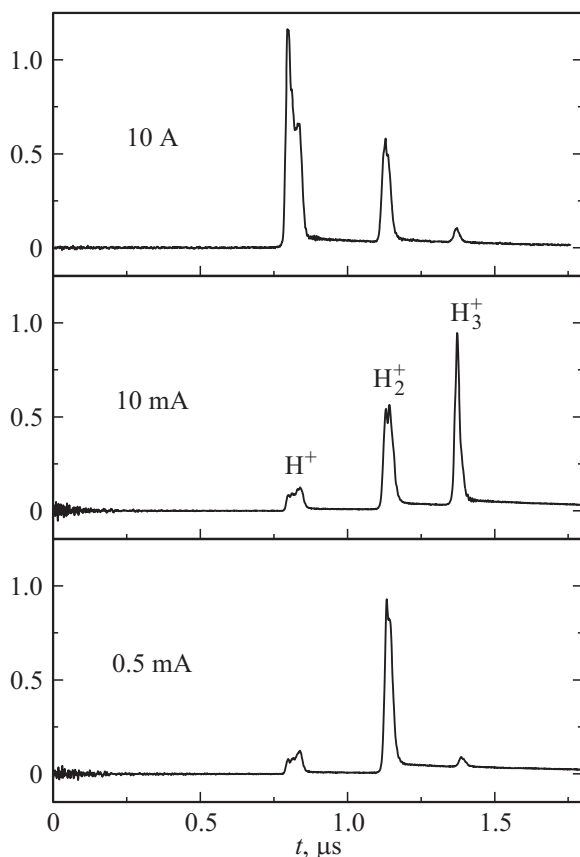


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока анода ВЭУ для различных токов разряда. Давление $1.8 \cdot 10^{-5}$ Торг. Ускоряющее напряжение 14 кВ.

при соответствующем снижении протонов. Доля ионов молекулярного водорода снижется в области низких давлений и в дальнейшем практически не изменится.

Такое влияние давления на долевой состав ионного пучка сохраняется при всех токах разряда.

В отличие от давления газа изменение тока разряда сложным образом влияет на процесс генерации ионов H_3^+ . Зависимость доли хайзонов в ионном пучке от тока разряда имеет максимум (рис. 5) и при оптимальных параметрах разряда доля хайзонов может достигать 70% от полного тока ионного пучка. Давление газа не меняет характер этой зависимости, но повышение давления сдвигает кривую в область больших значений тока разряда. Так же как и в исследованиях влияния давления на состав ионного пучка (рис. 4), изменение доли ионов H_3^+ в общем токе ионного пучка взаимосвязано, главным образом, с соответствующим изменением доли ионов H^+ . Существенное влияние тока разряда на генерацию ионов молекулярного водорода H_2^+

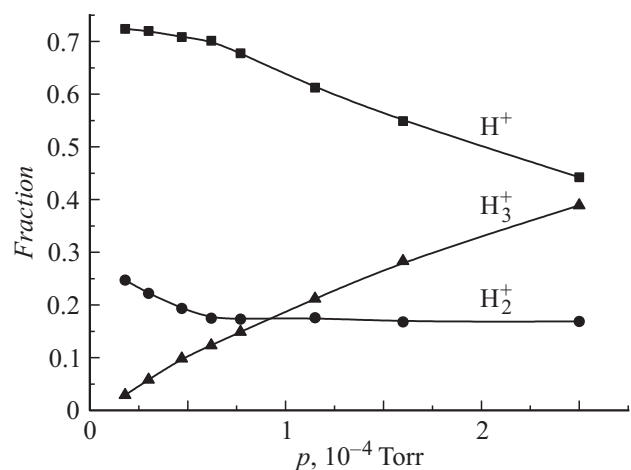


Рис. 4. Зависимость долевого отношения компонентов ионного пучка от давления. Ток разряда 10 А, ускоряющее напряжение 14 кВ.

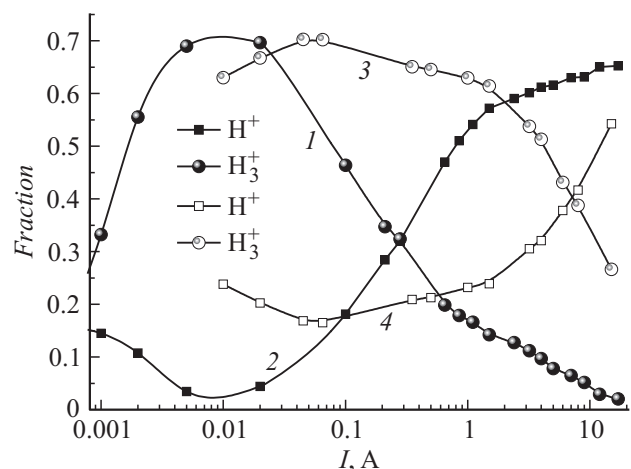
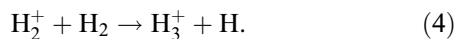
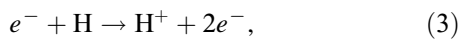
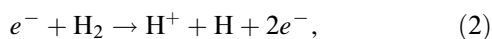
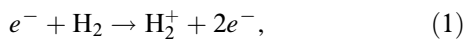


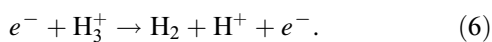
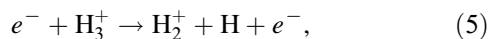
Рис. 5. Зависимости долей ионов H^+ (кривые 1, 3) и H_3^+ (2, 4) от тока разряда. Для кривых 1, 2 — давление газа $1.8 \cdot 10^{-5}$ Торг, стационарный режим 0.5–20 мА, квазистационарный режим 0.1–17 А; для кривых 3, 4 — давление $2 \cdot 10^{-4}$ Торг, квазистационарный режим.

проявляется лишь при относительно малых токах разряда уровня единиц миллиампер.

Детальное описание процессов генерации ионов водорода в разрядной системе отражательного разряда с полым катодом требует проведения теоретического анализа и численного моделирования процессов в разряде, а также постановку специальных экспериментов. На качественном уровне полученные экспериментальные зависимости могут быть связаны со следующими процессами образования компонентного состава ионов водорода [11]:



Распад ионов трехатомного водорода в плазме может осуществляться при столкновении с электронами, например, таким образом:



Очевидно, при малых токах (уровня 10^{-3} А) преобладают первичные процессы (1) и (2), поскольку концентрация плазмы мала по сравнению с концентрацией нейтральных атомов водорода. По мере увеличения концентрации плазмы влияние процесса (4), для которого требуется наличие иона H_2^+ , в определенном диапазоне токов (в эксперименте при давлении $1.8 \cdot 10^5$ Торр это $10^{-3} - 10^{-2}$ А) начинает возрастать. Очевидно, интенсивность процесса (3) также увеличивается, но возможно медленнее, чем процесса (4), что приводит к снижению доли H^+ в этом диапазоне токов. Начиная с некоторого значения тока разряда (в условиях эксперимента ~ 100 мА), влияние на ионный состав плазмы начинают оказывать процессы „выжигания“ газа. Снижение нейтрального газового компонента (молекул водорода H_2) уменьшает, согласно (4), скорость образования ионов H_3^+ . При более высоких токах разряда (в эксперименте это ток выше нескольких ампер) на более интенсивный распад хайзонов в процессах (5) и (6) может оказать влияние повышение температуры плазменных электронов, связанное с ростом напряжения горения разряда. Повышение давления газа, с одной стороны, повышает интенсивность образования хайзонов, с другой стороны, ослабляет влияние факторов, способствующих снижению доли ионов H_3^+ в плазме, и, таким образом, сдвигает процессы распада хайзонов в область более высоких значений тока разряда.

Заключение

Результаты проведенных исследований убедительно свидетельствуют о возможности создания на основе отражательного разряда с полым катодом эффективно-го источника ионов трехатомного водорода H_3^+ . При оптимальных значениях тока разряда и давления газа доля хайзонов в ионном пучке может достигать 70%. Изменение параметров разряда может обеспечить в этом же ионном источнике доминирование в ионном пучке протонов, а при относительно небольших токах разряда — и ионов молекулярного водорода.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-08-00484.

Список литературы

- [1] *Von Ardenne M.* Tabellen zur Angewandten Physics. Vol. 1. Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften, 1962. P. 653.
- [2] Handbook of ion sources / Ed. by B. Wolf. CRC Press, 1995. 544 p.
- [3] *Wendt G.L., Landauer R.S.* // J. Am. Chem. Soc. 1920. Vol. 42. N 5. P. 930–946.
- [4] *Вересов Л.П., Вересов О.Л., Дзюзя М.И., Жуков Ю.Н., Кузнецов Г.В., Цекава И.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 10. С. 50–53.
- [5] *Вересов Л.П., Вересов О.Л.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 10. С. 122–129.
- [6] *Вересов Л.П., Вересов О.Л., Чачаков А.Ф.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 132–135.
- [7] *Oka T.* // Phil. Trans. R. Soc. A. 2012. Vol. 370. P. 4991–5000.
- [8] *Oks E.M., Shandrikov M.V., Salvadori C., Brown I.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 083 502.
- [9] *Oks E.M., Shandrikov M.V., Vizir A.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. N 2. P. 02B703.
- [10] *Gushnets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. N 6. P. 063 301.
- [11] *Herbst E.* // Phil. Tr. Roy. Soc. A. 2000. Vol. 358. N 1774. P. 2523–2534.