

02;04;12

ФОРМИРОВАНИЕ ИОН-ИОННОЙ ПЛАЗМЫ В ПАУЗАХ ТОКА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

© А.А.Кудрявцев

Предложена интерпретация наблюдаемого в литературе эффекта относительно увеличения тока отрицательных ионов водорода при переходе к импульсному режиму питания источника. Она связана с уходом электронов из объема на начальных стадиях распада и образованием ион-ионной плазмы. Это обстоятельство может иметь принципиальное значение для понимания физических механизмов и оптимизации работы ионных источников.

Присутствие отрицательных ионов существенно влияет на процессы переноса различных компонентов плазмы. Так, в [1,2] было экспериментально обнаружено, что распад такой плазмы происходит в две стадии. На первой из них наблюдается плавное уменьшение тока положительных ионов на стенку при практически полном отсутствии тока отрицательных ионов. Затем в определенный момент времени последний внезапно возрастает и сравнивается с током положительных ионов.

Наблюдаемая в [1,2] картина объясняется в [3,4] следующим образом. На первой стадии распада отрицательные ионы заперты в объеме радиальным полем в плазме и пристеночным скачком потенциала на ее границах, так что их ток на стенках в это время фактически отсутствует. Плазма на этой стадии обедняется электронами и положительными ионами, и по мере увеличения относительной концентрации отрицательных ионов происходит переход к ион-ионной (безэлектронной) плазме. Этот переход может происходить скачкообразно, сопровождаясь быстрым уходом электронов из объема с одновременным резким нарастанием тока отрицательных ионов на стенки [1,2]. Вторая стадия определяется ион-ионной амбиполярной диффузией при относительно малой концентрации электронов.

Зондовые измерения параметров плазмы импульсного разряда в кислороде, выполненные в [5], выявили сходную картину. В работе [5] также было дано и количественное объяснение наблюдаемому явлению.

В данном сообщении показано, что с помощью указанных выше эффектов можно объяснить наблюдаемое в [6-9] относительное увеличение тока отрицательных ионов водорода при переходе к импульсному режиму питания. По нашему

мнению, высказанная в [6-9] интерпретация полученных там результатов, основанная только на различиях в скоростях объемных плазмохимических процессов неполна, поскольку она не учитывает принципиально важного аспекта наблюдаемых явлений, связанного со спецификой процессов переноса в электроотрицательных газах. Это обстоятельство может иметь принципиальное значение для понимания физических механизмов и оптимизации работы ионных источников.

В работах [6,8] на начальных стадиях распада наблюдалось увеличение зондового тока при лазерном фотоотрыве электронов от отрицательных ионов в призондовой области, которое на основании разработанной ранее методики связывалось с соответствующим увеличением концентрации отрицательных ионов. Затем, в определенный момент t_0 этот ток достигал максимума и далее начинал уменьшаться. В то же время концентрация электронов монотонно уменьшалась во времени послесвечения [6]. В работе [7] представлены результаты как масс-спектрометрических измерений ионных токов на стенки, так и зондовых измерений в объеме. Временное поведение токов положительных и отрицательных ионов на рис. 2 и 3 из [7] качественно подобно соответствующим зависимостям на рис. 6 и 7 из [2]. В свою очередь, зондовые характеристики, представленные на рис. 4 в [7] также подобны изображенным на рис. 9 работы [2] и рис. 1 работы [5]. Их симметричный вид, начиная с определенного времени послесвечения, свидетельствует о переходе к ион-ионной плазме с относительно малой концентрацией электронов.

В работах [6-9] предлагается следующая интерпретация полученных результатов. Предполагается, что после выключения импульса тока образование отрицательных ионов за счет диссоциативного прилипания электронов к колебательно возбужденным молекулам водорода меняется слабо. Главным механизмом гибели отрицательных ионов в активной фазе разряда предполагается их обдирка высокоэнергетическими электронами, эффективность которой резко падает при выключении поля. По мнению авторов [6-9], это приводит к относительному увеличению концентрации отрицательных ионов в объеме и, как следствию, их извлекаемого тока. Однако проведенные нами оценки показывают, что во всех реализуемых в [6-9] экспериментальных условиях, более эффективным из объемных источников гибели отрицательных ионов, является ион-ионная рекомбинация, имеющая большую константу скорости. Если вдобавок учесть, что эффективность диссоциативного прилипания падает с уменьшением концентрации и температуры электронов, то представленная интерпретация и сам факт

увеличения концентрации отрицательных ионов в послесвечении за счет объемных процессов, представляются маловероятными.

По нашему мнению, наблюдаемые в [6-9] эффекты аналогичны исследованным в [1,2,5] и описываются согласно результатам [5]. Исходя из этого можно предложить альтернативное объяснение наблюдавшимся в [6-9] экспериментальным фактам, основанное на специфике процессов переноса в плазме электроотрицательных газов.

На первой стадии концентрация положительных ионов n_p спадает с постоянной времени τ_p , определяемой их движением к стенкам разрядного объема:

$$n_p = n_{p0} \exp(-t/\tau_p). \quad (1)$$

Из баланса для электронов после выключения поля

$$dn_e/dt = -n_p/\tau_p \quad (2)$$

имеем

$$n_e = n_{p0} \exp(-t/\tau_p) - n_{n0}, \quad (3)$$

где n_{p0} и n_{n0} — начальные концентрации положительных и отрицательных ионов. На этой стадии отрицательные ионы заперты в объеме амбиполярным электрическим полем, которое соответствует больцмановскому распределению электронов. Поэтому поток отрицательных ионов наружу, кроме может быть окрестности выходного отверстия в плазменном электроде, к которому приложен большой вытягиваемый потенциал, отсутствует. Из (3) следует, что за время

$$t_0 = \tau_p \ln(n_{p0}/n_{n0}) \quad (4)$$

концентрация электронов резко уменьшается и в объеме остаются практически только положительные и отрицательные ионы, так что $n_p \sim n_n \gg n_e$. Амбиполярный потенциал при этом резко меняется, он перестает удерживать отрицательные ионы внутри источника. Поэтому начало второй стадии сопровождается резким нарастанием тока отрицательных ионов на стенки.

Для типичных значений $n_{p0}/n_{n0} = 10$, реализуемых в ионных источниках водорода, характерное время первой стадии $t_0 = (2-3)\tau_p$. В реализуемых в [6-9] условиях низких давлений $p = 1 \text{ мТор}$ длина свободного пробега ионов составляет величину 5-10 см, что сопоставимо с размерами разрядного объема $L = 20 \text{ см}$. Оценки по (4) дают для t_0 величину 20-100 мкс, что хорошо соответствует наблюдаемым в [6-9].

Таким образом, в работе предложена интерпретация наблюдаемого в литературе эффекта относительного увеличения тока отрицательных ионов водорода при переходе к импульсному режиму питания источника. Она связана с относительно быстрым уходом электронов из объема на начальных стадиях распада. Это обстоятельство может иметь принципиальное значение для понимания физических механизмов и оптимизации работы ионных источников. Так, в [10,11] при изменении давления и скважности импульсов тока наблюдалось изменение во времени тока отрицательных ионов как в активной фазе разряда, так и в послесвечении.

Следует также отметить, что специфика процессов переноса может проявляться и стационарных источниках отрицательных ионов с магнитным фильтром, в которых камера делится на область источника, где образуется плазма и область вытягивания, куда она диффундирует. Например, в [11] при изменении граничных условий для заряженных частиц путем изменения напряжения смещения на плазменном электроде, а также при изменении ускоряющего и вытягивающего потенциалов, наблюдалось существенное изменение тока отрицательных ионов в различных фазах импульсного разряда.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Л.Д. Цендину за стимулирующие обсуждения и большую помощь в работе.

Список литературы

- [1] *Puskett L.J., Kregel M.D., Teague M.W.* // *Phys. Rev. A.* 1971. V. 4. P. 1659–67.
- [2] *Smith D., Dean A.G., Adams N.G.* // *J. Phys.D: Appl. Phys.* 1974. V. 7. P. 1944–1962.
- [3] *Цендин Л.Д.* // *ЖТФ.* 1985. Т. 55. С. 2318–2322.
- [4] *Рожанский А.В., Цендин Л.Д.* Столкновительный перенос в частичноионизованной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
- [5] *Гуцев С.А., Кудрявцев А.А., Романенко В.А.* // *ЖТФ.* 1995. Т. 65. С. 77–85.
- [6] *Hopkins M.B., Bakal M., Graham W.G.* // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. P. 2009–2014.
- [7] *Katsh H.-M., Quandt E.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1992. V. 25. P. 430–435.
- [8] *Mellon K.N., Coonan B.P., Hopkins M.B.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994. V. 27. P. 2480–2486.
- [9] *Hopkins M.B., Mellon K.N.* // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. P. 449–452.
- [10] *Michaut C., Bacal M., Belchenko Yu.I., Auvray J., Konieczny C., Stephan J.P.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1994. V. 65. P. 1207–1209.
- [11] *Bacal M., Belchenko Yu.I., Puissant D.* Proceedings of 5th European Workshop on the Production and Application of Light Negative Ions, 23–25 March 1994, Dublin City University. P. 90–95.

Научно-исследовательский
институт физики
С.-Петербургского государственного
университета

Поступило в Редакцию
27 июня 1996 г.