

01;02;12

©1994 г.

ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА, РАБОТАЮЩИЙ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*В.П.Горецкий, А.В.Рябцев, И.А.Солошенко,
А.Ф.Тарасенко, А.И.Шедрин*

Институт физики, 252650, Киев
(Поступило в Редакцию 11 августа 1993 г.)

Проведено численное моделирование элементарных процессов в водородной плазме источника отрицательных ионов с отражательным разрядом в импульсно-периодическом режиме работы. Показано, что при определенном соотношении между частотой следования и длительностью токовых импульсов средняя концентрация отрицательных ионов может быть выше плотности H^- в стационарном режиме при одинаковой вкладываемой мощности.

1. Исследование источников отрицательных ионов водорода представляет интерес в связи с созданием инжекторов нейтральных частиц, необходимых для нагрева плазмы в термоядерных установках. Особое внимание уделяется объемным источникам, работающим без добавок паров щелочных металлов (последние могут значительно ухудшать высоковольтную прочность ускоряющих промежутков).

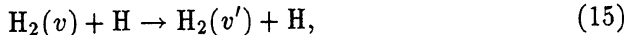
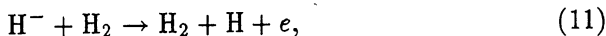
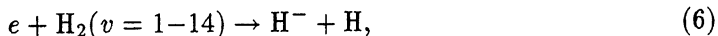
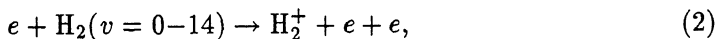
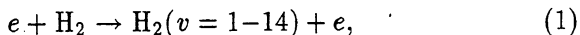
Как известно, основным каналом образования ионов H^- в водородной плазме объемных источников отрицательных ионов является диссоциативное прилипание к колебательно-возбужденным молекулам $H_2(v > 5)$ [1,2]. Поэтому скорость генерации отрицательных ионов прямо пропорциональна концентрации высоковозбужденных молекул водорода. Количество последних зависит от температуры и плотности электронов, концентрации атомарного водорода, размеров камеры [3].

Важную роль в балансе отрицательных ионов играют также процессы их гибели. К таковым в первую очередь следует отнести ион-ионную рекомбинацию и рассеяние ионов H^- на электронах.

Временная эволюция каждого из перечисленных выше процессов после поджига разряда в ионном источнике имеет различный характер. В связи с медленным процессом регенерации H на стенках камеры наибольшее время релаксирует к своему стационарному значению концентрация атомарного водорода N_H . Поскольку атомарный водород играет важную роль в снятии колебательных возбужденных молекул, то на начальном участке импульса концентрация ионов

H^- может превышать свое стационарное значение. Это обстоятельство позволяет рассчитывать на то, что в импульсно-периодическом режиме работы источника можно получить заметно больший выход отрицательных ионов. С целью проверки данного предположения было проведено численное моделирование кинетических процессов в импульсно-периодическом режиме работы разряда. Показано, что при определенном соотношении между частотой следования и длительностью токовых импульсов средняя концентрация отрицательных ионов может превышать плотность H^- в стационарном режиме при одинаковой вкладываемой мощности.

2. Численное моделирование элементарных процессов в водородной плазме проведено на примере источника отрицательных ионов с отражательным разрядом [5]. В этом источнике разряд поддерживается электронами, выходящими из накаливаемого катода и осциллирующими в газоразрядной камере вдоль магнитного поля. Напряжение на разряде $V_p \approx 150$ В, ток разряда до 10 А, а давление в разрядной камере $10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт.ст. Диаметр разрядной камеры ≈ 0.5 см, диаметр разрядной колонны ≈ 0.25 см, длина разрядной колонны ≈ 6 см. Извлечение ионов H^- производится через щель в аноде поперек магнитного поля напряженностью до 2 кГс. Расчеты проведены в широком диапазоне токов разряда, частот следования и длительностей импульсов, форма которых предполагались прямоугольными. Кинетические уравнения, описывающие временную эволюцию концентраций H , H_2 , $H_2(v)$, H^+ , H_2^+ , H^- , решались совместно с уравнением Больцмана для электронов n_e [6], из которого определялись скорости элементарных процессов. Ниже (1)–(15) приведены основные процессы, прямо или косвенно оказывающие значительное влияние на динамику образования и гибели отрицательных ионов,



Процессы (12), (13) описывают рекомбинацию ионов на антикатоде и стенках камеры. Что касается процесса (14), то здесь имеется в виду регенерация H с адсорбированным на стенках камеры водородом.

Полный список реакций, которые учитывались в расчетах, и методики решения уравнений описаны в предыдущих наших работах [6,7].

3. На рис. 1 представлена временная эволюция концентраций H^- , H , $H_2(v=9)$ и температуры электронов T_e для одиночного импульса тока длительностью $2.5 \cdot 10^{-5}$ с. Наблюдаются два максимума в зависимости $H^-(t)$. Для выяснения механизмов, приводящих к появлению этих максимумов, были проведены еще два расчета, в первом из них не учитывались потери отрицательных ионов за счет столкновений с электронами (процесс (7)), а во втором коэффициент регенерации молекулярного водорода на стенках искусственно увеличен в 10^6 раз. Временные зависимости концентраций ионов H^- для этих двух расчетов представлены кривыми 2 и 3 соответственно. Как видно из сравнения кривых 1 и 2, учет потерь ионов H^- за счет столкновений с электронами приводит к исчезновению максимума на заднем фронте импульса и к увеличению N_{H^-} в течение импульса. Таким образом, появление максимума на заднем фронте импульса обусловлено резким охлаждением электронов (кривая 6) при более плавном уменьшении концентраций электронов и возбужденных атомов. Повышение плотности отрицательных ионов в послеразрядный период наблюдалось в экспериментальной работе [8]. Как следует из сравнения кривых 1 и 3,

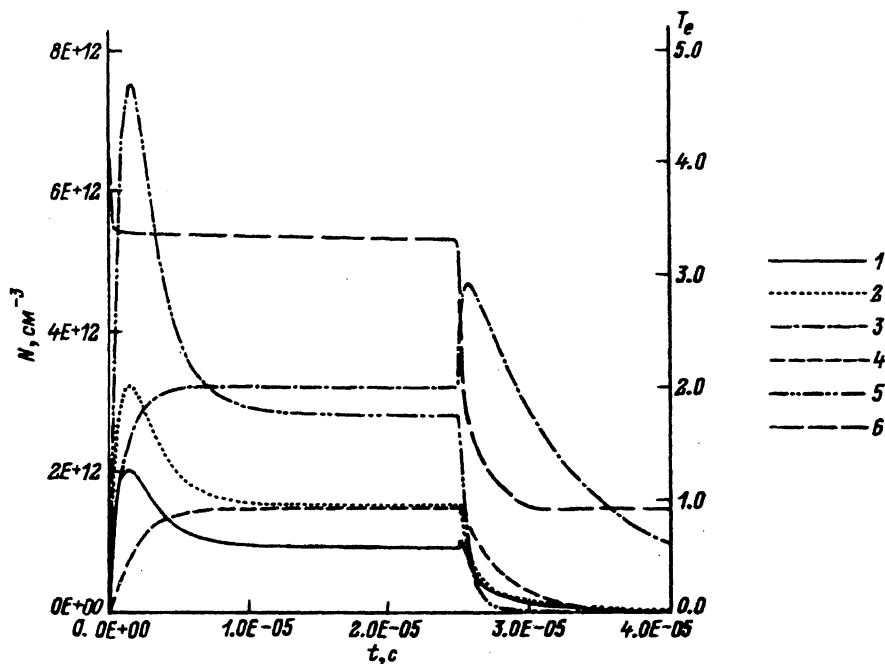


Рис. 1. Временная эволюция концентраций H^- , H , H_2 и температуры электронов T_e в плазме источника.

1-3 — концентрация H^- , 4 — концентрация H (умножено на 10^{-4}), 5 — концентрация $H_2(v=9)$, 6 — T_e .

повышение скорости регенерации H_2 (уменьшение концентрации атомарного водорода) приводит к исчезновению другого максимума и повышению концентрации ионов H^- в течение импульса. Поэтому можно утверждать, что появление максимума за передним фронтом импульса связано с более медленным нарастанием концентрации атомов водорода (кривая 4), чем плотностей плазмы и возбужденных молекул.

Как видно из рис. 1, при токе разряда в импульсе $I_p = 25$ А максимум плотности ионов H^- наблюдается через $\tau_H = 2 \cdot 10^{-6}$ с после включения разряда. Это время по порядку величины близко или ниже характерного времени выхода концентрации атомов водорода на стационарный уровень. Время распада плазмы τ_p после выключения импульса составляло $\approx 3 \cdot 10^{-6}$ с. Выбор длительности Δt и периода следования T импульсов определялся этими двумя характерными временами. С одной стороны, для того чтобы количество атомарного водорода было достаточно мало, требуется выполнение неравенств $\Delta t \ll \tau_H$ и $(\Delta t)/T \ll 1$, с другой стороны, для того чтобы плазма не успевала распадаться, необходимо $T \ll \tau_p$. Таким образом, в расчете принималось $\Delta t \approx 10^{-7}$ с, $T \approx 10^{-6}$ с.

На рис. 2 представлена динамика изменения концентраций H^- , $H_2(v=9)$, H и T_e в течение одного периода в импульсно-периодическом режиме на квазистационарной стадии (время выхода на квазистационарную стадию $\approx \tau_H$). Плотность отрицательных ионов во время токового импульса падает, что обусловлено высокой электронной температурой в этот момент (рис. 2, а, з) и интенсивной гибелью H^- в реакции (7). И наоборот, рост концентрации H^- после импульса тока, несмотря на уменьшение $N_{H_2(v)}$ и n_e (n_e — плотность электронов), связан с охлаждением электронов. Следует отметить, что средняя электронная температура как в стационарном, так и в импульсном режимах практически одинаковая при равных энергозатратах. В стационарном разряде плотности H^- и $H_2(v)$ ниже при том же среднем токе вследствие, как уже отмечалось, более высокой концентрации атомарного

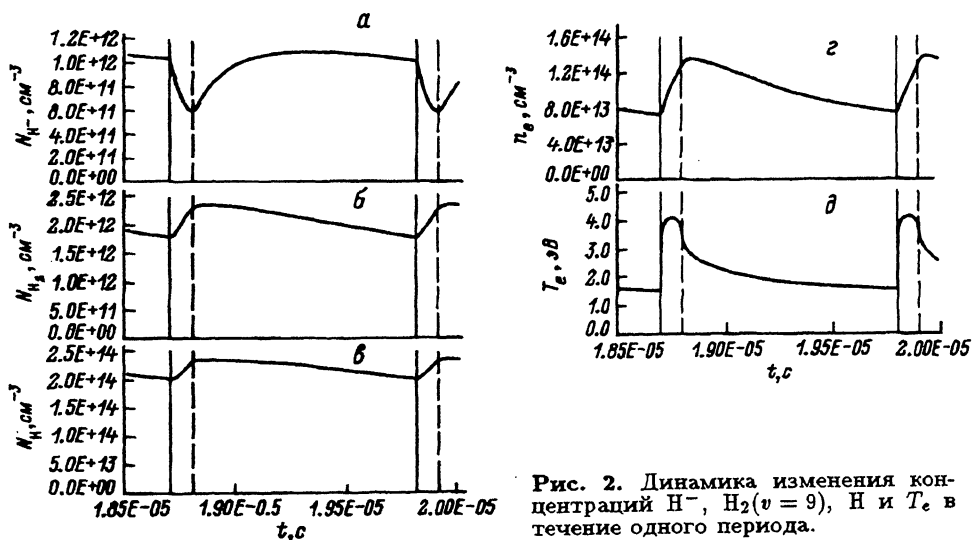


Рис. 2. Динамика изменения концентраций H^- , $H_2(v=9)$, H и T_e в течение одного периода.

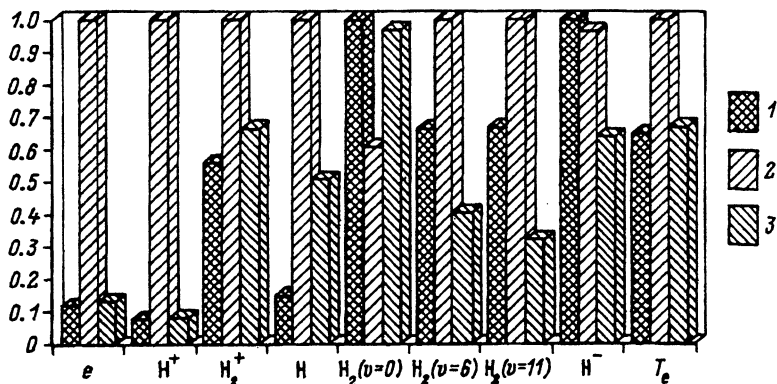


Рис. 3. Сравнительная гистограмма средних по времени концентраций компонент плазмы в источнике.

Напряжение разряда 129 В; 1 — импульсный режим, ток разряда (в импульсе) 25 А, средний ток 2.5 А; 2 — стационарный режим, ток разряда 25 А; 3 — стационарный режим, ток разряда 2.5 А.

водорода. Данную ситуацию наглядно иллюстрирует рис. 3, где в относительных единицах представлены средние значения плотностей различных компонент смеси и плазмы в импульсно-периодическом и стационарном разрядах.

Концентрация H^- немонотонно зависит от среднего разрядного тока (рис. 4), при больших энерговыкладах исчезают различия между

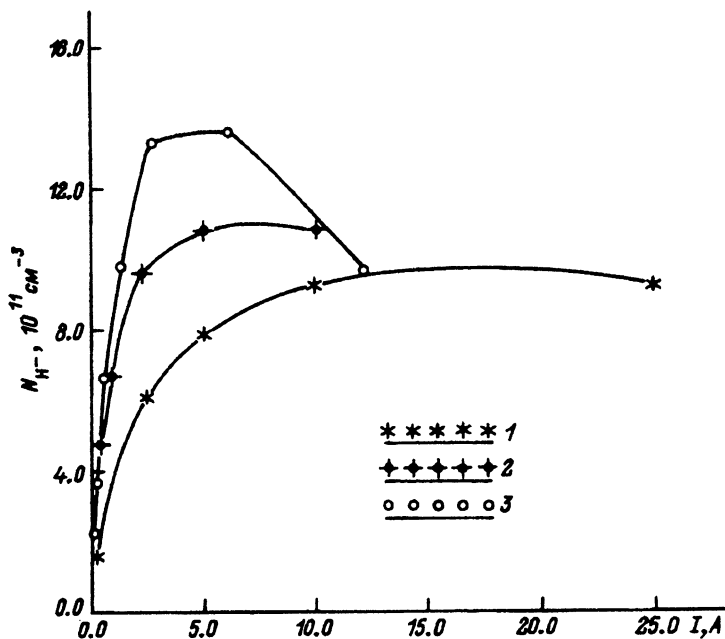


Рис. 4. Зависимость концентрации H^- в плазме источника от среднего разрядного тока при $U_p = 120$ В.

1 — стационарный режим; 2 — длительность разрядного импульса 0.1 мкс, длительность паузы 1 мкс; 3 — длительность разрядного импульса 0.1 мкс, длительность паузы 4 мкс.

импульсно-периодическим и стационарным разрядом, поскольку за время импульса тока плотность N в разряде достигает своего предельного значения $N_H \approx N_{H_2}$. Аналогичное явление имеет место и при малых энерговкладах, но по причине низкой концентрации N и отсутствия вклада процесса (15) как в стационарном, так и в импульсном разрядах.

4. Таким образом, численное моделирование кинетических процессов в источнике отрицательных ионов с отражательным разрядом показало, что при определенных удельных энерговкладах концентрация отрицательных ионов водорода в импульсно-периодическом разряде превышает плотность N^- в стационарном режиме. Увеличение концентрации N^- в импульсном разряде обусловлено более низким содержанием атомарного водорода вследствие изменения соотношения между временем его наработки и регенерации.

Список литературы

- [1] *Wadehra J.M., Bardsley J.N.* // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 18. P. 2433.
 - [2] *Allen M., Wonng S.F.* // Phys. Rev. Lett. 1978. Vol. 41. P. 1795.
 - [3] *Berlemont P., Skinner D.A., Bacal M.* // Chem. Phys. Lett. 1991. Vol. 183. P. 397.
 - [4] *Gorse C., Capittelli M., Bacal M. et al.* // Chem. Phys. 1987. Vol. 117. P. 177.
 - [5] *Горецкий В.П., Солошенко И.А., Тарасенко А.Ф.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 11. С. 201.
 - [6] *Головинский П.М., Горецкий В.П., Рябцев А.В. и др.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 10. С. 46.
 - [7] *Горецкий В.П., Рябцев А.В., Солошенко И.А. и др.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 9. С. 46.
 - [8] *Hopkins M.B., Bacal M., Graham G.* // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70. P. 2009.
-