

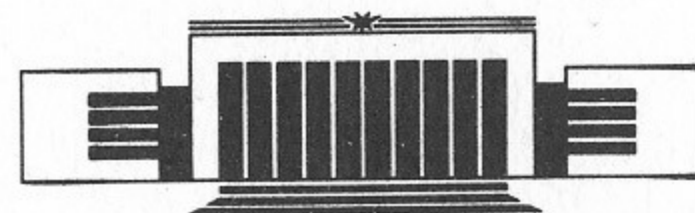


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Ю.И. Бельченко, А.С. Куприянов

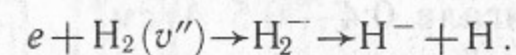
**ГЕНЕРАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ  
В ЧИСТО-ВОДОРОДНЫХ РАЗРЯДАХ  
ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

**ПРЕПРИНТ 88-7**



НОВОСИБИРСК

В последнее десятилетие значительно вырос интерес к чисто-водородным газоразрядным системам генерации ионов  $H^-$  в связи с экспериментальным подтверждением предсказания Демкова (1965 г.) и расчетов [1] о многократном увеличении ( $\sim 10^4$  раз) сечения образования отрицательных ионов водорода при диссоциации колебательно-возбужденных молекул электронами [2]



Новый интенсивный канал образования ионов  $H^-$  через колебательно-возбужденные молекулы водорода позволил объяснить anomalно высокую величину плотности ионов  $H^-$  в водородной плазме [3] и anomalно высокий выход ионов  $H^-$  из газовых разрядов в чистом водороде [4—7]. Экспериментальное обнаружение и разработка поверхностно-плазменного метода генерации отрицательных ионов в газовых разрядах с пониженной работой выхода электродов, позволяющего получать многоамперные пучки ионов  $H^-$  с эмиссионной плотностью тока свыше  $5 \text{ A/cm}^2$  [8, 9], выдвинули на первый план работы по поверхностно-плазменным источникам (ППИ), использующим сильноточные тлеющие разряды в водороде с добавкой цезия [10—13]. Однако еще в 1972 г. было замечено, что и в чисто-водородном режиме планотронного поверхностно-плазменного источника извлекаются пучки ионов  $H^-$  с anomalно высокой эмиссионной плотностью тока ионов  $H^-$  до  $0,75 \text{ A/cm}^2$  [8, 13] при сравнительно низкой плотности водорода в разряде  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Были исследованы энергетические спектры получаемых ионов

$H^-$ , в которых прослеживалась малая доля ионов  $H^-$ , образуемых за счет перезарядки быстрых протонов на поверхности катода. Однако подавляющая часть ионов  $H^-$  имела энергию, соответствующую анодному потенциалу и свидетельствовала в пользу «объемного» механизма генерации  $H^-$  [14]. Неоднозначность механизма столь интенсивной генерации ионов  $H^-$  в планотронном разряде увеличивала ценность экспериментальной информации, поэтому большинство новых ППИ, создаваемых в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, в первую очередь исследовалось в чисто-водородном режиме, при этом вакуумные объемы, оборудование и диагностическая аппаратура тщательно очищались от следов цезия. Проведенные исследования ППИ свидетельствовали о сильном влиянии процессов на катоде на выход ионов  $H^-$  и в чисто-водородном режиме [8]. Это проявлялось в зависимости выхода ионов  $H^-$  от материала и толщины катода, от расстояния между катодом и эмиссионной щелью. Так, если из планотрона плоская центральная часть катода убиралась вообще, полный ток ионов  $H^-$  уменьшался. Однако, благодаря близости «боковых» катодов к эмиссионной щели эмиссионная плотность тока ионов  $H^-$  в такой модифицированной (пеннинговской) геометрии в чисто-водородном режиме достигала  $0,4-0,5 \text{ A/cm}^2$ .

Для полномасштабной проверки эффективности работы ППИ в чисто-водородном режиме были проведены эксперименты по вытягиванию ионов  $H^-$  из многоапертурного ППИ с большой эмиттирующей поверхностью, которые подтвердили роль процессов на катоде на генерацию  $H^-$  в чисто-водородном разряде. Результаты этих экспериментов приводятся ниже.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Исследовались чисто-водородные режимы работы ППИ с полупланотронной геометрией электродов, т. е. с разрядом в скрещенных полях без замыкания дрейфа электронов (рис. 1). Сильноточный тлеющий разряд поддерживался в узком протяженном зазоре между массивным молибденовым катодом и анодной крышкой. В пространстве между боковыми выступами катода обеспечивались осцилляции электронов вдоль силовых линий магнитного поля, создаваемого внешним электромагнитом. Как и в оригинальной конструкции полупланотрона [15], для обеспечения зажигания

самостоятельного разряда при низком давлении водорода на одном из торцов катода была сделана поджиговая выемка с увеличенной до 4 мм величиной боковых выступов катода и улучшенным удержанием и накоплением электронов. Из поджиговой выемки за счет дрейфа в скрещенных полях плазма распространялась в рабочий междуэлектродный зазор. Водород подавался как в поджиговую область, так и дополнительно в протяженный междуэлектродный зазор через узкие щелевые отверстия в теле катода. Для определения влияния формы поверхности катода на эмиссию ионов  $H^-$  использовались как плоские, так и «сотовые» катоды [16], у которых эмиттирующая часть была покрыта сферически-вогнутыми лунками, расположенными в ортогональном порядке на поверхности катода. Вытягивание отрицательных ионов из сотовых источников производилось как через отверстия в геометрическом фокусе катодных лунок (I на рис. 2), так и через отверстия вдали от точки геометрического фокуса (II на Рис. 2). Температура катода контролировалась термопарой.

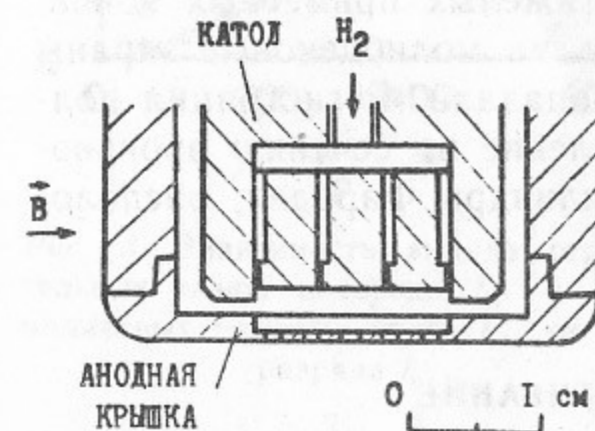


Рис. 1. Схема ППИ с полупланотронной геометрией катода (разрез вдоль силовых линий магнитного поля).

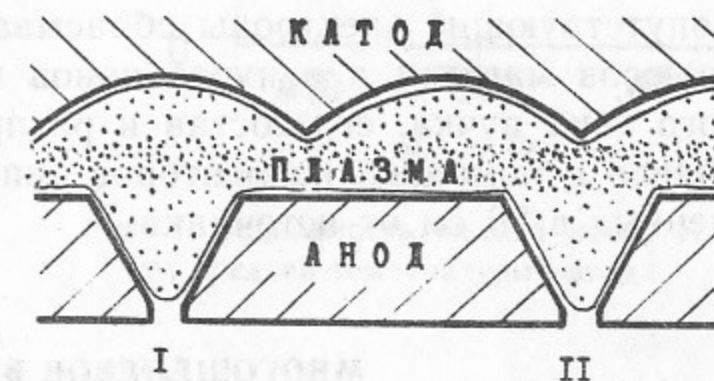


Рис. 2. Схема геометрической фокусировки частиц на эмиссионные отверстия:

I — эмиссионное отверстие в геометрическом фокусе, II — эмиссионное отверстие вдали от точки геометрического фокуса.

Для того, чтобы создать в примыкающей к эмиссионным отверстиям области прианодную плазму с пониженной температурой электронов, в анодной крышке, как и в [5], изготавливалась анодная выемка. Ширина и профиль боковых стенок анодной выемки варьировались. В режиме оттренированных и разогретых электродов при магнитном поле  $0,1-0,3 \text{ T}$  и толщине плазменного слоя  $0,5-1,0 \text{ мм}$  самостоятельный тлеющий разряд напряжением  $300-400 \text{ В}$  поддерживался в междуэлектродном зазоре при сред-

ней плотности водорода свыше  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При увеличении тока разряда необходимая для поддержания разряда плотность водорода увеличивалась. Ток разряда менялся в диапазоне 10—750 А. При холодных электродах или при недостаточной подаче водорода напряжение разряда имело величину 500—700 В.

Вытягивание отрицательных ионов (ОИ) производилось с помощью многощелевого вытягивающего электрода через систему щелевых и круглых отверстий в анодной крышке. Вытягивающее напряжение до 25 кВ подавалось на корпус источника, вытягивающий электрод заземлялся. Исследовалась эмиссия ионов  $\text{H}^-$  в режиме коротких (0,6—3,0 мс) и длинных (до 0,6 с) импульсов. В режиме длинных импульсов применялось стационарное вытягивающее напряжение с защитой и повторным включением после пробоя в вытягивающем промежутке, а также вытягивание пакетом коротких прямоугольных импульсов напряжения длительностью 0,5—1,0 мс и частотой повторения до 100 Гц.

Внешнее магнитное поле источника 0,1—0,3 Т хорошо отделяло пучок вытягиваемых ионов  $\text{H}^-$  от тяжелых примесных ионов. Сопутствующие электроны сбрасывались на молибденовые экраны полюсов магнита и в пучок ионов не попадали. Регистрация полного тока пучка, его состав и распределение по сечению производились с помощью коллекторов типа цилиндра Фарадея, расположенных в 20 см от источника.

### МНОГОЩЕЛЕВОЕ ВЫТЯГИВАНИЕ

Импульсное вытягивание ОИ через 5 узких эмиссионных щелей размерами  $0,8 \times 52$  мм применялось при работе с плоскими молибденовыми катодами. Зависимость выхода ионов  $\text{H}^-$  от тока разряда в чисто-водородном режиме многощелевого полупланотрона приведена на рис. 3. В диапазоне тока разряда 50—200 А выход ионов  $\text{H}^-$  возрастал линейно, далее прирост тока ионов  $\text{H}^-$  замедлялся, однако насыщение выхода  $\text{H}^-$  до токов разряда 600 А обнаружено не было. При токе разряда 600 А (средняя плотность тока разряда на катоде  $60 \text{ А/см}^2$ ) был получен пучок ионов  $\text{H}^-$  интенсивностью более 1 А и средней плотностью тока в эмиссионных щелях до  $0,5 \text{ А/см}^2$ . Полный вытягиваемый ток ОИ имел величину 1,2 А, однако до 17% пучка составляли примесные тяжелые ионы  $\text{O}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Mo}^-$  (рис. 3). Выход тяжелых ионов был

максимален в начале импульса и уменьшался с постоянной времени спада 0,5—1,0 мс. Скорость спадания увеличивалась при увеличении тока разряда. Передний фронт импульса тока ионов  $\text{H}^-$  был на 0,1—0,3 мс длиннее, чем фронт импульса тока разряда. Крутизна переднего фронта ионов  $\text{H}^-$  увеличивалась при увеличении тока разряда. В остальном импульс ионов  $\text{H}^-$  повторял особенности тока разряда.

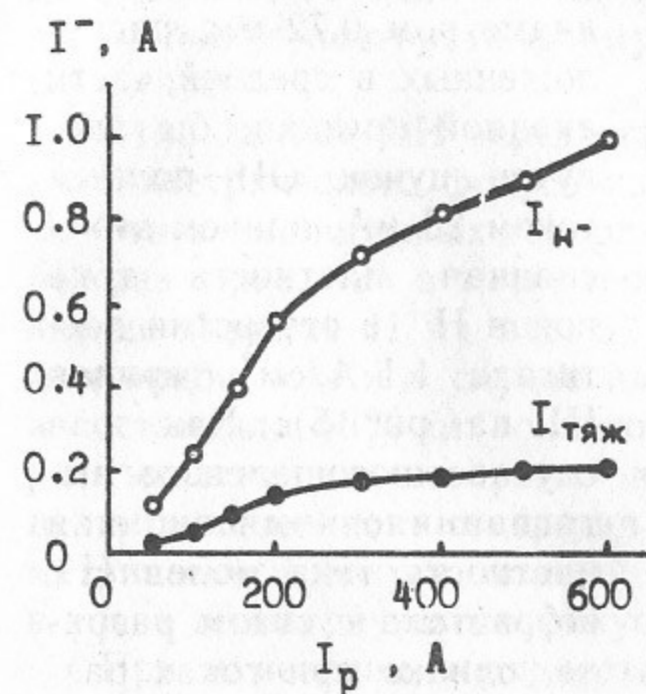


Рис. 3. Зависимость выхода отрицательных ионов водорода  $I_{\text{H}^-}$  и тока примесных тяжелых ионов  $I_{\text{тяж}}$  от тока разряда  $I_{\text{р}}$ .

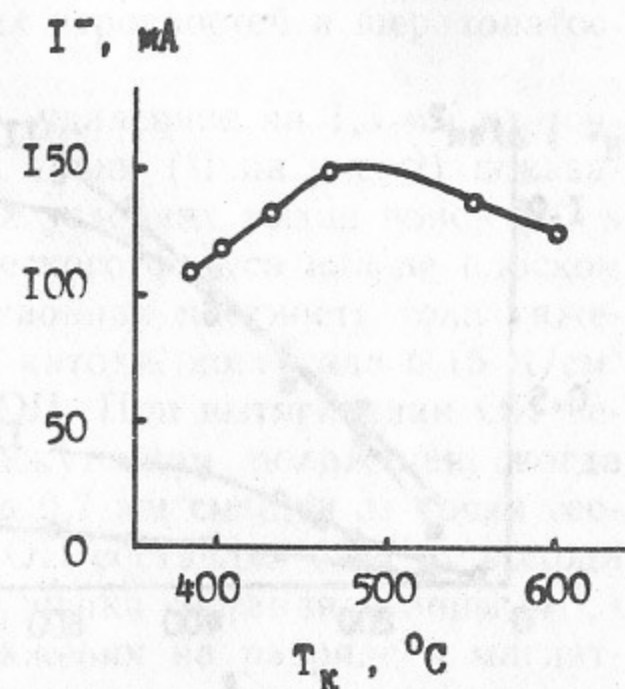


Рис. 4. Зависимость выхода ионов  $\text{H}^-$  от средней температуры катода.

Максимальный выход ионов  $\text{H}^-$  из чисто-водородного режима достигался при минимальной поддерживающей разряд плотности молекул водорода  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что было существенно ниже, чем оптимальная плотность молекул в отражательном разряде [4] или в планотроне [8]. Этот факт свидетельствовал о более высокой скорости образования ионов  $\text{H}^-$  через молекулы, так что добавление газа в разряд подавляло этот механизм (или усиливало каналы разрушения  $\text{H}^-$ ). При вытягивании ОИ из полупланотрона были обнаружены и другие несвойственные «объемным» источникам зависимости. Так, выход ионов  $\text{H}^-$  зависел от температуры электродов (рис. 4) и достигал максимального значения при средней температуре катода 750 К. Температура анода при этом составляла 600 К.

## КРУГЛЫЕ ЭМИССИОННЫЕ ОТВЕРСТИЯ

Более детальное исследование эмиттирующей способности полупланотрона проводилось при импульсном и квазистационарном (до 0,6 с) вытягивании ОИ через круглые эмиссионные отверстия различного профиля. С плоским катодом при вытягивании через

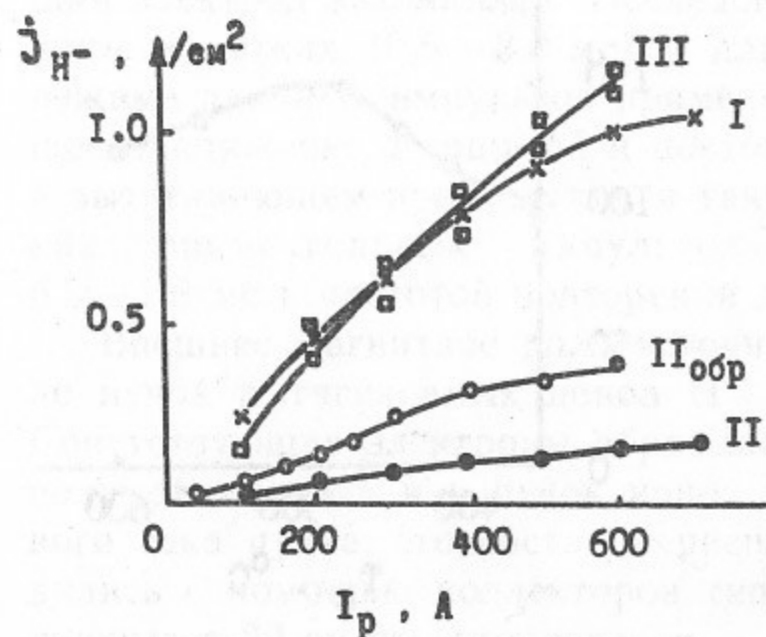


Рис. 5. Зависимость эмиссионной плотности тока ионов  $H^-$  от тока разряда.

I — эмиссионное отверстие в геометрическом фокусе, II — эмиссионное отверстие вдали геометрического фокуса, II<sub>обр</sub> — в «обращенной» геометрии, III — плоский катод.

пять круглых отверстий диаметром 0,72 мм, расположенных в средней части анодной крышки, был получен пучок ОИ полным током 28 мА, причем эмиссионная плотность тока ионов  $H^-$  в отверстии достигала 1,1 А/см<sup>2</sup> (кривая III на рис. 5). Как и в случае многощелевого вытягивания, эмиссионная плотность тока ионов  $H^-$  возрастала с током разряда, однако при токах разряда 200 А темп прироста тока ионов  $H^-$  замедлялся.

Сильное влияние на эмиссию отрицательных ионов оказывала форма прилегающей к эмиссионным отверстиям поверхности катода. Так, при использовании сотового катода и вытягивании отрицательных ионов через круглое отверстие в геометрическом фокусе (I на рис. 2) полный выход отрицательных ионов возрос в два раза по сравнению с плоским катодом. Однако, как показал масс-анализ пучка, эмиссионная плотность ионов  $H^-$  в точке «геометрической фокусировки» изменилась слабо (кривая I на рис. 5), тогда как выход примесных тяжелых ОИ вырос в 5 раз по сравнению с плоским катодом. После непродолжительной работы с сотовым катодом на внутренней поверхности анодной крышки в точках геометрического фокуса отчетливо проявились следы распыления пучком тяжелых ОИ. При токах разряда меньше 100 А следы распыления имели диаметр 1 мм,

при работе с током разряда до 300—600 А диаметр следов распыления увеличивался до 2 мм. Перечисленные факты свидетельствовали об образовании тяжелых ОИ на поверхности катода за счет распыления адсорбата. «Дефокусировка» тяжелых ОИ при больших токах разряда объясняется уменьшением толщины ленгмюровского слоя прикатодного падения потенциала, при этом граница плазменного слоя, контактирующая с поверхностью лунки катода, начинает повторять форму мелких неровностей и шероховатостей лунки.

Вытягивание ОИ через отверстие, удаленное на 1,5 мм от точки геометрического фокуса катодной лунки (II на рис. 2) показало, что в аналогичных газоразрядных условиях выход ионов  $H^-$  в 5-6 раз ниже, чем в точке геометрического фокуса или на плоском катоде (кривая II на рис. 5). Эмиссионная плотность тока тяжелых ионов, как и в случае плоского катода, достигала 0,15 А/см<sup>2</sup> и составляла 50% от полного тока ОИ. При вытягивании ОИ через эмиссионное отверстие в промежуточном положении, когда центр эмиссионного отверстия был на 0,7 мм смещен от точки геометрического фокуса, полный выход ОИ составлял 65% от выхода в точке геометрического фокуса, 60% пучка составляли ионы  $H^-$ .

При изменении полярности напряжения на разряде и магнитного поля в междуэлектродном зазоре при таких же значениях плотности водорода, магнитного поля и напряжения поддерживался разряд с «обращенной» геометрией, когда внешний корпус выполнял функции катода, а внутренний электрод — анода. Эмиссионная плотность ионов  $H^-$  в «обращенной» геометрии достигала величины 0,4 А/см<sup>2</sup> (кривая II<sub>обр</sub> на рис. 5), при этом выход примесных ионов, как и в случае плоского полупланотрона, не превышал 20% от полного тока пучка ОИ.

Анализ пучка положительных ионов, вытягиваемых через отверстие в катоде «обращенной» геометрии показал, что полный поток положительных ионов на катод пропорционален току разряда и уменьшается при увеличении плотности молекулярного водорода. Состав ионного тока на катод зависел от тока разряда и плотности водорода. При токе разряда 180 А и минимальной подаче газа соотношение ионных токов  $I_{H^+} : I_{H_2^+} : I_{H_3^+} : I_{тяж}$  имело величину 0,5:3:2:1, т. е. более 3/4 ионного тока на катод составлял поток молекулярных ионов  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ . При увеличении тока разряда доля молекулярных ионов уменьшалась, что могло приводить к снижению скорости роста выхода  $H^-$  (рис. 2).

## КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ

Испытания полупланотрона в режиме длинных импульсов показали, что, несмотря на импульсный перегрев электродов до  $800^\circ\text{C}$ , однородный сильноточный тлеющий разряд имеет те же характеристики и сохраняет способность эмиттировать ионы  $\text{H}^-$  с высокой эмиссионной плотностью вплоть до токов разряда 90 А и длительностей до 0,6 с. Дальнейшее продвижение по току было ограничено квазистационарными системами питания тока разряда, а не характеристиками источника. Ввиду ограниченной скорости откачки вакуумной системы ( $2 \cdot 10^4$  л/с) было проведено вытягивание пучка через 90 круглых эмиссионных отверстий  $\varnothing 0,72$  мм, расположенных в ортогональном порядке на анодной крышке с шагом 3 мм. При токе разряда 60 А и длительности импульса 0,12 с выход ионов  $\text{H}^-$  из полупланотрона с плоским катодом составлял 0,1 А при средней эмиссионной плотности  $0,3 \text{ А/см}^2$ . При увеличении тока разряда до 90 А и длительности импульса до 0,6 с выход ОИ увеличивался до 0,15 А. При этом из-за перегрева электродов к концу разрядного импульса выход ионов уменьшался до 0,1 А.

## МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

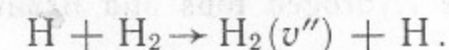
Как показывают эксперименты, в чисто-водородных режимах поверхностно-плазменных источников скорость генерации ионов  $\text{H}^-$  сильно зависит от формы, состояния и температуры поверхности катода, от ее удаления от эмиссионных отверстий и т. п. Механизм влияния поверхности на генерацию ионов  $\text{H}^-$  в описываемых чисто-водородных режимах может отличаться от хорошо исследованного поверхностно-плазменного механизма цезиево-водородных разрядов, в которых осуществляется прямая конверсия в  $\text{H}^-$  или прямая десорбция  $\text{H}^-$  с катода быстрыми газоразрядными частицами [9].

В чисто-водородных режимах прямая конверсия потока положительных ионов на поверхности молибденового катода в ионы  $\text{H}^-$ , имеет величину  $K^- = I^-/I_{\text{H}^+} \sim 10^{-2}$  при энергиях бомбардировки 300—400 эВ с использованием молекулярных ионов  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}_3^+$  [17] и может давать ощутимый вклад в скорость генерации  $\text{H}^-$ .

Наряду с прямой конверсией в ионы  $\text{H}^-$  поверхность электродов чисто-водородных разрядов может быть интенсивным источни-

ком колебательно-возбужденных молекул, из которых затем в объеме плазмы за счет столкновений с медленными электронами образуются ионы  $\text{H}^-$  [18]. Процессу накачки колебательных возбуждений молекул благоприятствует высокое содержание молекулярных ионов в потоке частиц, поступающих на обогащенный водородом приповерхностный слой катода. Скорость генерации  $\text{H}^-$  и  $\text{H}_2(v'')$  на поверхности может зависеть от ее состояния и температуры.

Другим источником колебательно-возбужденных молекул могут быть столкновения быстрых атомов с молекулами в объеме плазмы:



Быстрые нейтралы, составляющие большую часть отражаемого от поверхности катода потока ускоренных водородных частиц, могут возбуждать молекулы как в основном столбе плазмы разряда, так и непосредственно в прианодной области и зоне формирования пучка ионов  $\text{H}^-$ , а также приводить к более сильному разрушению ионов  $\text{H}^-$  и молекул  $\text{H}_2(v'')$  при больших токах разряда в случае ГФ (рис. 5).

В целом можно считать, что и в чисто-водородных режимах поверхностно-плазменных источников интенсивная генерация ОИ реализуется благодаря взаимодействию частиц плазмы с поверхностью электродов, однако более эффективно поверхностно-плазменный механизм работает в цезиево-водородных режимах ППИ [9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование чисто-водородных разрядов поверхностно-плазменных источников показало, что эмиссионная плотность тока ионов  $\text{H}^-$  пропорциональна току разряда и достигает  $1,1 \text{ А/см}^2$  при средней плотности тока разряда на катоде  $60 \text{ А/см}^2$ . В импульсном режиме из чисто-водородного ППИ получен пучок  $\text{H}^-$  интенсивностью свыше 1 А, в квазистационарном режиме длинных импульсов пучок ионов  $\text{H}^-$  имел величину 0,15 А при токе разряда 90 А. Высокая скорость генерации ионов  $\text{H}^-$  в чисто-водородном режиме обусловлена прямой конверсией быстрых газоразрядных частиц на поверхности катода в ОИ, а также интенсивной генерацией колебательно-возбужденных молекул на поверхностях электродов и в объеме плазмы.

Авторы благодарят профессора Г.И. Димова за полезные обсуждения и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bardsley J.N. and Wadehra J.M. Phys. Rev., 1979, v.A20, p.1398.
2. Allan M. and Wong S.F. Phys. Rev. Lett., 1978, v.41, p.1791.
3. Bacal M. and Hamilton G.W. Phys. Rev. Lett., 1979, v.42, p.1538.
4. Ehlers K.W. Nucl. Instrum. and Meth., 1965, v.32, p.309.
5. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. ЖТФ, 1973, т.43, с.1720.
6. Golubev V.P., Nalivaiko G.A., Tserakin S.G. Proc. Los Alamos Conf. «Proton Linear Accelerator», 1972, p.356.
7. Габович М.Д., Козырев Ю.Н., Найда А.П. ПТЭ, 1980, №2, с.45.
8. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Доклады АН СССР, 1973, т.213, с.1283.
9. Belchenko Yu.I., Dimov G.I., Dudnikov V.G., In: Proc. Symp. on Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, Brookhaven, 1977, N.Y., 1977, BNL-50727, p.79.
10. Proceedings of the Second International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams /Ed. by K. Prelec., N.Y., 1980, BNL-51304.
11. Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams (3-rd International Symp., Brookhaven, 1983)/Ed. by K. Prelec: AIP Conf. Proc. N111, N.Y., 1984.
12. Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams (4-th International Symp., Brookhaven, 1986)/Ed. by J. Alessi: AIP Conf. Proc. N158, N.Y., 1987.
13. Belchenko Yu.I., Dimov G.I., Dudnikov V.G. Nucl. Fusion, 1974, v.14, p.113.
14. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Известия АН СССР, сер. физическая, 1973, т.37, с.2573.
15. Belchenko Yu.I., Dudnikov V.G., Journal de Phys. (Paris), 1979, 40, colloque c7, N7, p.501; также препринт ИЯФ СО АН СССР №78-95, Новосибирск, 1978.
16. Бельченко Ю.И. Физика плазмы, 1983, т.9, с.1219.
17. Massman P., Norman H.J. and Los J. Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v.165, p.531.
18. Kato A.M., Hiskes J. and de Boni T. In [12], p.97.

Ю.И. Бельченко, А.С. Курпrianов

**Генерация отрицательных ионов  
в чисто-водородных разрядах  
поверхностно-плазменных источников**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 14 января 1988 г.  
Подписано в печать 21.01.1988 г. МН 08049  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 7

---

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.