

04;10;12

©1993 г.

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА ПЕННИНГОВСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ $H^-$

*В.В. Анциферов, В.В. Бескорвайный*

Впервые исследованы пространственно-временные характеристики плазмы разряда поверхностно-плазменного пеннинговского источника ионов  $H^-$  при использовании спектроскопических методов. Определена температура атомов водорода в водородно-цезиевой плазме и прослежено изменение плотности компонентов плазмы за время длительности разрядного импульса. Обнаружено запираание ионов цезия и молибдена у катодной поверхности.

### Введение

Параметры плазмы водородно-цезиевого разряда планотронного источника ионов  $H^-$  были исследованы нами спектроскопическими методами в [1]. Предварительные результаты спектроскопических исследований пеннинговского источника ионов  $H^-$  приведены в [2]. В настоящей работе более детально исследованы пространственно-временные характеристики плазмы водородно-цезиевого разряда источника с пеннинговской геометрией электродов.

### 1. Схема эксперимента

Схема исследованного модифицированного пеннинговского источника (ПИГ) ионов  $H^-$  приведена на рис. 1. Электроды источника были изготовлены из особо чистого молибдена (катоды *1a*, *1b* и анод *2*). Электроны осциллировали между катодами *1a* и *1b* в полях  $\vec{E} \parallel \vec{B}$ . Излучение плазмы разряда через диагностическую щель размером  $0.2 \times 10$  мм в анодной камере, коллимирующую щель в шторке, находящейся внутри вакуумного объема, и кварцевое стекло в стенке вакуумной камеры с помощью конденсора фокусировалось на входные щели регистрирующих приборов [1]. При исследовании пространственных характеристик разряда использовалась анодная камера с четырьмя диагностическими щелями *I–IV* (рис. 1). Через щель *I* исследовалось излучение плазмы вблизи зоны катода, при этом в щель *I* не попадало излучение, испускаемое с поверхности катода, которое исследовалось с помощью щели *IV* при угле захвата объема вблизи поверхности катода  $\sim 2^\circ$  (общий угловой

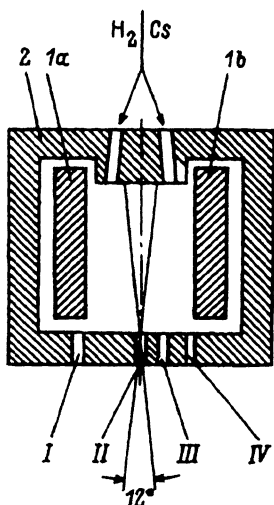


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры с пеннинговской геометрией электродов.

аксептанс каждой щели составлял  $12^\circ$ ). Через щель II наблюдался центральный участок плазмы разряда, а через щель III — промежуточный. Использование ряда диагностических щелей и шторки позволило определить динамику компонентов и основные параметры плазмы разряда ПИГа с пространственным разрешением по двум координатам.

Основные технические параметры ПИГа и подача водорода и цезия в разряд были аналогичными планотронному источнику [1], только площадь катодов в ПИГе была в два раза меньше и составляла  $2.5 \text{ см}^2$ . Вольт-амперные характеристики режимов разряда ПИГа были также близки к подобным характеристикам планотрона. Исследования плазмы разряда проводились в основном в режимах I и Ia (рис. 2), имеющих минимальные шумы и более стабильные параметры разряда, с использованием той же диагностической аппаратуры [1].

## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

2.1. Спектр излучения плазмы разряда. Спектр излучения, элементный и зарядовый состав плазмы разряда ПИГа были практически аналогичными планотрону [1], различие наблюдалось только в значениях величин интенсивностей отдельных спектральных линий.

2.2. Интенсивности излучения спектральных линий компонентов плазмы разряда. Динамика интенсивностей отдельных спектральных линий излучения плазмы разряда исследовалась в режимах I (рис. 2,а) и Ia (рис. 2,б). Режим I в ПИГе был очень чувствительным к плотности цезия в разряде, незначительное уменьшение которого приводило к возникновению различных неустойчивостей в разряде и переходам от шумовой к бесшумовой моде в процессе импульса разряда (рис. 2,в). Это качественно видоизменяло кинетику интенсивностей всех спектральных линий, за исключением линий молибдена. Режим Ia обладал большей устойчивостью к шумам в разряде благодаря более высокой плотности цезия в разряде.

Водород. При малых токах разряда интенсивности излучения балмеровских линий водорода были пропорциональны плотности тока разряда и плотности водорода, подаваемого в разряд, а их кинетика на всех

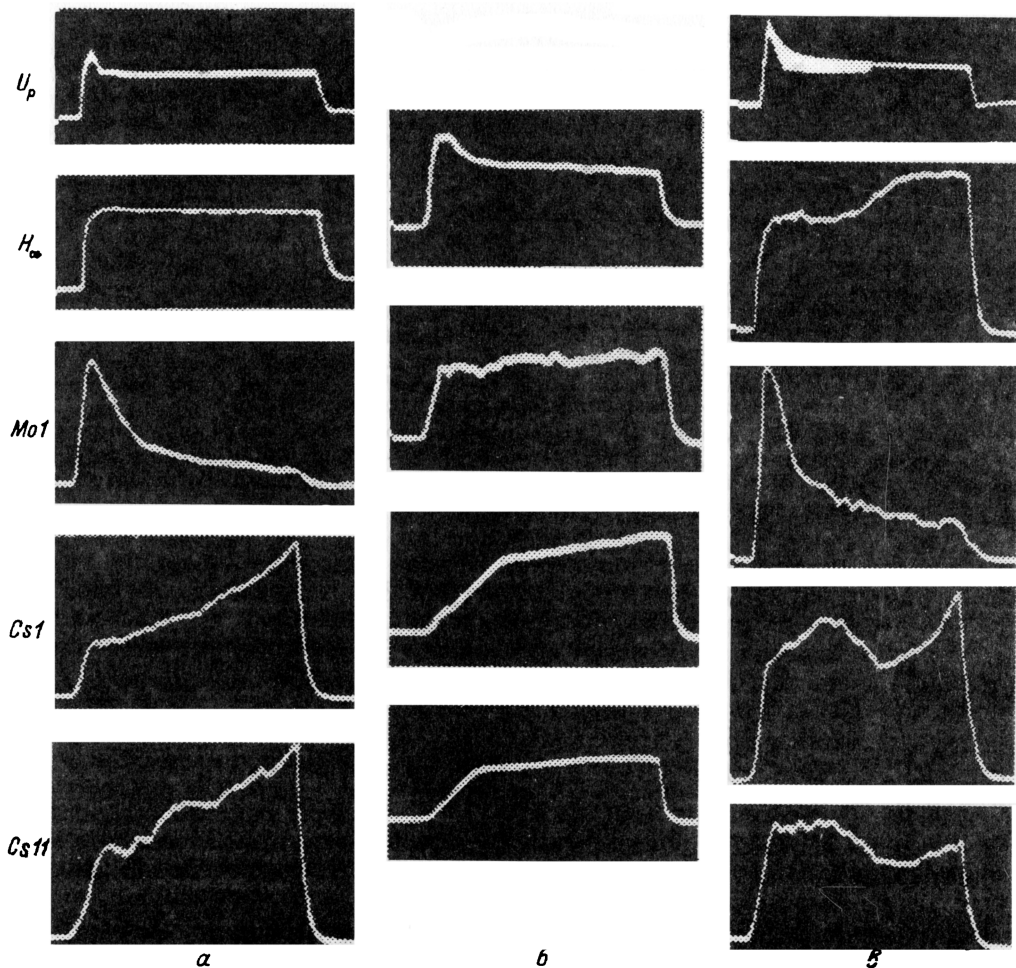


Рис. 2. Осциллограммы напряжения разряда  $U_p$  и интенсивностей спектральных линий  $H_\alpha$ , MoI(553.3 нм), CsI(852.1 нм), CsII(460.4 нм) в режимах 1 (а), 1а (б) и неустойчивом режиме 1 (е).

Ток разряда 80 А, диагностическая щель IV. Цена деления по горизонтали — 200 мкс, по вертикали  $U_p$  — 200 В,  $H_\alpha$  — 10 (а) и 5 В (б,е), MoI — 0.1 (а) и 0.05 В (б,е), CsI — 0.2 (а,е) и 2.5 В (б), CsII — 2 (а,е) и 10 В (б).

диагностических щелях повторяла форму газового импульса водорода в режиме 1 или форму импульса напряжения разряда в режиме 1а. Пространственное распределение плотности водорода было однородным по всей длине разряда (рис. 3,б), а зависимости яркости балмеровских линий от тока разряда имели линейный характер (рис. 3,а) (расчет яркостей на графиках производился с учетом спектральной чувствительности фотоумножителя и акцептанса системы регистрации для каждой диагностической щели).

С увеличением тока разряда скорость роста интенсивностей балмеровских линий излучения замедлялась, при больших токах разряда происходило их насыщение, величина которого зависела от плотности моле-

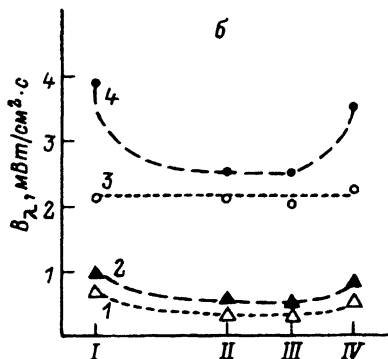
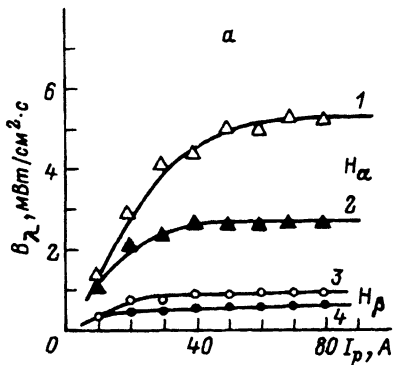


Рис. 3. а — яркости  $B_{\lambda}$ -бальмеровских линий водорода  $H_{\alpha}$  (1,2) и  $H_{\beta}$  (3,4) в зависимости от тока разряда  $I_p$  для различных областей разряда в режиме 1а: 1,3 — край IV щели; 2,4 — центр II щели; б — пространственное распределение яркостей  $B_{\lambda}$ -линий водорода  $H_{\beta}$  (1,2) и  $H_{\alpha}$  (3,4) для различных областей (щели I–IV) и токов разряда  $I_p = 20$  (1,3) и 80 А (2,4).

кулярного водорода и от положения атомов водорода в разряде. Насыщение яркостей излучения этих линий (рис. 3,а) может быть обусловлено как частичным вытеснением водорода из зоны разряда, так и замедлением скоростей роста плотностей ионов  $H^{-}$  и  $H^{+}$  в плазме разряда. Среди основных каналов образования возбужденных атомов водорода в состоянии  $n = 3$  наибольшей скоростью реакции обладает процесс взаимной нейтрализации ионов водорода ( $H^{-} + H^{+} \rightarrow H^{*} + H^0$ ). Для этого процесса  $\langle \sigma V \rangle = 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [3]. С учетом зондовых измерений плотностей ионов  $H^{-}$  и  $H^{+}$  [4],  $N_{H^{-}} \cdot N_{H^{+}} \cdot \langle \sigma V \rangle \approx 10^{20} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ . Кинетика интенсивностей бальмеровских линий при больших токах разряда достаточно хорошо совпадала в режимах 1 и 1а, за исключением передних фронтов импульсов излучения (рис. 2,а,б). При больших плотностях тока разряда происходили вытеснение водорода из середины разрядного промежутка и его концентрация у катодов источника (рис. 3,б).

Цезий. При малых токах разряда зависимости яркостей цезиевых линий от тока разряда имели линейный характер (рис. 4,а,б). В этом случае наблюдался резкий выброс интенсивности излучения на переднем фронте импульса, обусловленный возбуждением цезия в объеме разрядного промежутка, с провалом интенсивности в центре и дальнейшим ее ростом к концу импульса, связанным с выделением цезия в разряд за счет бомбардировки электродов. Асимметричное распределение яркости линии CsI (852.1 нм) (рис. 4,в) по диагностическим щелям показывает, что определяющий вклад в излучение этой линии дает эмиссионная поверхность катода и прилегающий тонкий слой плазмы, которые можно видеть только через щель IV. Симметричное же распределение яркости линии CsI (455.5 нм) (рис. 5,б) свидетельствует о том, что основной вклад в интенсивность этой линии дает излучение из объема разряда. Кроме того, наблюдалось существенное отличие в поведении интенсивностей этих двух линий в центре разряда и вблизи катодов. Если в центре разряда характер зависимостей интенсивностей этих линий совпадал, то вблизи катодов он качественно отличался, насыщение интенсивности линии CsI (455.5 нм) происходило уже на переднем фронте разрядного импульса. Высокая концентрация ионов цезия в прикатодном слое, вызванная силь-

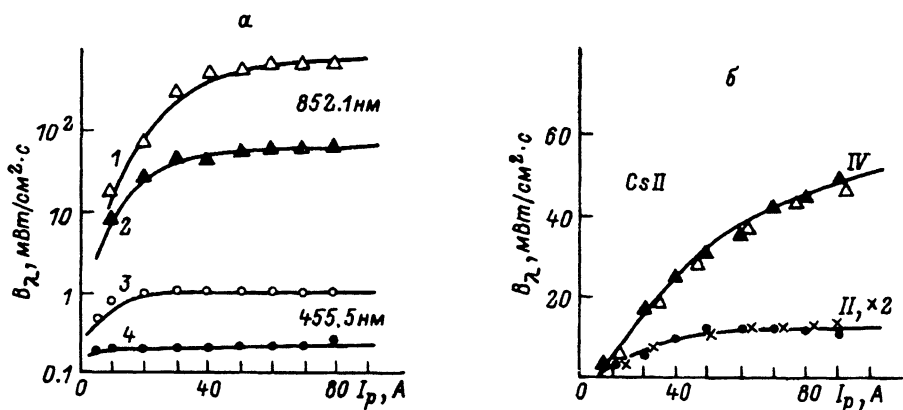


Рис. 4.

а, б — зависимости яркостей  $V_{\lambda}$ -спектральных линий атомов и ионов цезия от тока разряда в режиме 1а по диагностическим щелям: 1 — край IV щели; 2, 4 — центр II щели; 3 — центр IV щели; в — пространственное распределение яркостей  $V_{\lambda}$ -цезиевых линий  $\text{CsI}(852.1 \text{ нм})$  (2, 3) и  $\text{CsII}(460.4 \text{ нм})$  (1) для различных областей и токов разряда  $I_p = 20$  (3) и 80 А (1, 2), режим 1а.

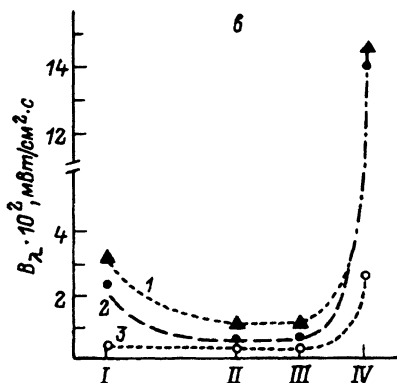


Рис. 5.

а — зависимости яркостей  $V_{\lambda}$ -линии  $\text{MoI}(553.3 \text{ нм})$  от тока разряда в режиме 1а для различных областей разряда: 1 — центр и край II щели, 2 — центр IV щели, 3 — край IV щели; б — пространственное распределение яркостей  $V_{\lambda}$ -линий  $\text{CsI}(455.5 \text{ нм})$  (1, 2) и  $\text{MoI}(553.3 \text{ нм})$  (3, 4) для различных областей в режиме 1а и тока разряда  $I_p = 20$  (2, 4) и 80 А (1, 3).

атомов. Причем в центре разрядного промежутка это насыщение происходило при меньших токах разряда, что связано с уменьшением плотности цезия в центре и вытеснением его на катоды. Это приводило к еще более сильной асимметрии в пространственном распределении яркостей линии CsI (852.1 нм) и линий ионов цезия (рис. 4, *е*) по диагностическим щелям I–IV. При этом у катодов яркости линий ионов цезия продолжали нарастать с увеличением тока разряда вплоть до 100 А (рис. 4, *б*). В режиме 1 при больших плотностях тока разряда кинетика интенсивностей излучения линий атомов и ионов цезия была практически идентичной на всех диагностических щелях (рис. 2, *а*) и она хорошо совпадала с кинетикой интенсивностей этих линий в планотроне [1]. Интенсивности излучения цезиевых линий значительно возрастали в режиме 1*а* при форсированной подаче цезия в разряд, когда он становился практически цезиево-водородным. Однако это не приводило к существенным изменениям общего характера поведения импульсов излучения этих линий во времени (рис. 2, *б*).

Молибден. В режиме 1 у катодов молибден выбивается, как и в планотроне, преимущественно в начале газоразрядного импульса (рис. 2, *а*), а в более цезированном режиме 1*а* эмиссия молибдена и его возбуждение происходило более равномерно в течение всего разрядного импульса (рис. 2, *б*). В центре разрядного промежутка насыщение интенсивностей линий молибдена происходило значительно быстрее ввиду небольшой его плотности и кинетика интенсивностей излучения его линий повторяла форму импульса тока разряда в отличие от IV щели. Подобный характер зависимости излучения линий молибдена наблюдался также у катодов в режиме 1*а*. У катодов яркости излучения линий молибдена возрастали в 2–3 раза и насыщение интенсивностей излучения его линий достигалось при более высоких токах разряда (рис. 5, *а*). О запырении атомов молибдена вблизи катодов свидетельствует также пространственное распределение яркости излучения его линий по диагностическим щелям, которое было симметричным с максимумами у катодов (рис. 5, *б*).

2.3. Температура атомов водорода. Температура атомов водорода в плазме разряда определялась по доплеровскому уширению  $H_{\alpha}$ -линии, типичная интерферограмма спектра которой, полученная за один разряд-

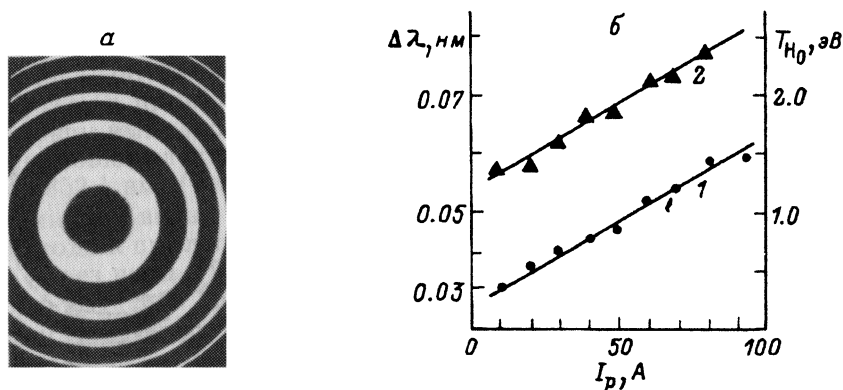


Рис. 6. *а* — интерферограмма спектра излучения  $H_{\alpha}$ -линии в режиме 1 на IV щели при токе разряда 80 А, область дисперсии интерферометра Фабри-Перо 0.215 нм; *б* — зависимости ширины  $\Delta\lambda$  спектра  $H_{\alpha}$ -линии (левая шкала) и температуры атомов водорода  $T_{H_0}$  (правая шкала) от тока разряда  $I_p$  в режиме 1 для ПИГа (2) и планотрона (1).

ный импульс, приведена на рис. 6,а. Как показало микрофотометрирование в спектре излучения  $H_{\alpha}$ -линии в ПИГе, как и в планотроне, тонкая структура линии не проявлялась. Температура атомов водорода линейно зависела от тока разряда (рис. 6,б), и ее значение всегда было больше в центре разряда, чем у катодов. Поскольку плотность тока разряда в ПИГе в два раза больше, чем в планотроне, при одном значении тока разряда, то полученные значения температуры атомов водорода достаточно хорошо согласуются для этих двух источников ионов  $H^{-}$ .

## Выводы

Экспериментально измеренные с достаточно высокой точностью основные параметры плазмы разрядов источников ионов  $H^{-}$  с пространственным разрешением позволяют создать более достоверные теоретические модели этих источников.

## Список литературы

- [1] Анциферов В.В., Бескоровайный В.В., Бельченко Ю.И. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР. № 88-116. Новосибирск, 1988. 21 с.
- [2] Antsiferov V.V., Beskorovaynyy V.V., Belchenko Yu.I. et al. // *Produc. Neutr. Negative Hydr. Ions and Beams. Proc. V Intern. Symp. AIP Conf. Proc. N 210. Brookhaven, 1990. P. 427-447.*
- [3] Janev R.K. *Atomic and Molecular Processes in Hydrogen-Helium Plasmas. Report PPPL-TM-368. 1985.*
- [4] Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г., Куприянов А.С. Препринт ИЯФ СО АН СССР. № 88-14. Новосибирск, 1988. 26 с.

Сухумский физико-технический институт

Поступило в Редакцию  
18 марта 1992 г.  
В окончательной редакции  
17 августа 1992 г.