

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ЦЕЗИЙ-ВОДОРОДНОГО РАЗРЯДА

*Ф.Г.Бахит, Г.А.Дюжеев, Л.И.Елизаров,
В.Г.Иванов, А.Г.Филатов, С.М.Школьник*

1. Одной из основных проблем, возникающих при инжекции быстрых нейтралов в термоядерных установках, является создание эффективных источников отрицательных ионов водорода (дейтерия), способных обеспечить плотности ионного тока в пучке $j_i \gtrsim 0.1 \text{ А/см}^2$. С этой точки зрения весьма перспективны объемные источники отрицательных ионов $[1-4]$. В работах $[5-7]$ была теоретически показана возможность реализации низковольтного разряда (НР), горящего в смеси цезия с молекулярным водородом и характеризующегося высокой концентрацией N_{H^-} отрицательных ионов водорода.

По данным расчета НР в Cs-H_2 может гореть при весьма низких напряжениях (потенциал гашения $U_{\text{Г}} \gtrsim 1 \text{ В}$). При напряжениях $U \lesssim 8 \text{ В}$ плазма в зазоре образуется за счет ионизации малой добавки цезия $N_{\text{Cs}}/N_{\text{H}_2} \lesssim 10^{-2}$. Водород при этом остается неионизированным и в основном недиссоциированным. Энергия катодного пучка расходуется главным образом на нагрев тепловых электронов плазмы $[8]$. При оптимальных для генерации H^- параметрах разряда $[9]$ $p_{\text{H}_2} L \sim$ несколько Тор·мм, $p_{\text{Cs}} \simeq 10^{-2}$ Тор ($p_{\text{H}_2}, p_{\text{Cs}}$ — парциальные давления H_2 и Cs , L — зазор) концентрация $N_{\text{H}^-} \gtrsim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Ионы H^- образуются в разряде за счет диссоциативного прилипания разогретых тепловых электронов плазмы к молекулам H_2 , возбужденным на достаточно высокие колебательные уровни $v \geq 6$ $[10]$. Высокий темп генерации ионов H^- в НР связан в первую очередь с оптимальным значением электронной температуры в разряде ($T_e \gtrsim 1 \text{ эВ}$), а также с достаточно большой концентрацией электронов ($n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и относительно высоким давлением водорода ($p_{\text{H}_2} \sim 1 \text{ Тор}$). Последнее обстоятельство определяет накачку высоковозбужденных колебательных уровней молекул H_2 . Эти уровни заселяются в основном за счет $v - v$ -обмена с нижними колебательными уровнями молекул H_2 , которые эффективно возбуждаются тепловыми электронами $[7]$.

Несмотря на повышенный интерес к низкотемпературной водородной плазме, НР в смесях щелочных металлов с H_2 ранее экспериментально не исследовался. Известно лишь сравнительно небольшое число экспериментальных работ, посвященных исследованию тлеющего разряда в смеси (Cs-H_2) , выполненных в длинных трубках при $U \sim 100 \text{ В}$ и малых токах $I \lesssim 100 \text{ мА}$ (см., например, $[11]$). В настоящей работе излагаются первые результаты экспериментального исследования НР в смеси Cs-H_2 . Приводятся результаты зондовой диагностики плазмы и их предварительное сопоставление с теорией.

2. Эксперименты проводились в диоде с плоскопараллельной геометрией электродов. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

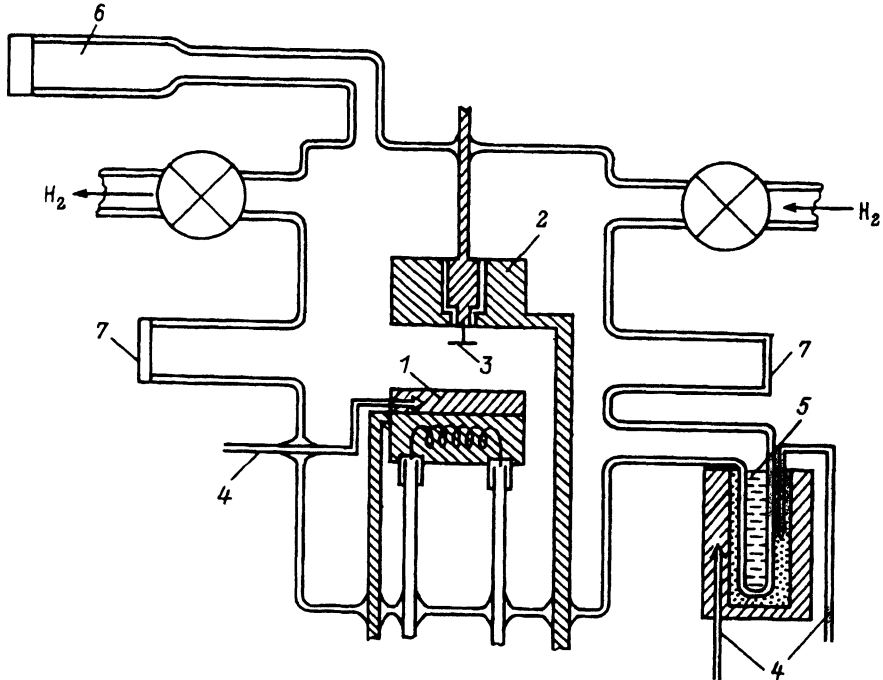


Рис. 1. Экспериментальный прибор.
 1 — катод, 2 — анод, 3 — зонд, 4 — термопары, 5 — резервуар с жидким цезием, 6 — измеритель давления водорода, 7 — окна из плавленного лейкосапфира для вывода излучения.

Электродами служили торцы цилиндров диаметром 12 мм. Использовался катод с косвенным подогревом, рабочая поверхность которого была изготовлена из платины. Межэлектродное расстояние $L = 3$ мм. Нерабочие поверхности изолировались с помощью ВеО и плавленного лейкосапфира. В межэлектродный промежуток сквозь отверстие в центре анода вводился цилиндрический вольфрамовый зонд. Длина рабочей части зонда 2 мм, диаметр 0.1 мм. Зонд был ориентирован параллельно плоскостям электродов и удален на расстояние 1 мм от анода. Электродная система монтировалась в стеклянной колбе объемом $V \sim 10^3 \text{ см}^3$. До начала измерений объем тщательно обезгаживался.

Давление p_{Cs} паров цезия поддерживалось путем стабилизации температуры (± 1 К) специального резервуара с жидким цезием, содержащего 3–5 г Cs. Водород получался путем электролиза воды и очищался при пропускании через палладиевый натекатель. Давление водорода измерялось термопарной лампой ПМТ-6-3. Изменение давления p_{H_2} контролировалось в процессе эксперимента. При изменении режимов горения разряда давление p_{H_2} балансировалось с помощью вентилях на входе и выходе системы с точностью $|\Delta p_{\text{H}_2}|/p_{\text{H}_2} < 0.1$. При этом максимальная скорость прокачки водорода не превышала 10^{-6} г/с.

Для питания разряда использовался специальный импульсный генератор, обеспечивающий прямоугольные импульсы напряжения. Стабильность напряжения была не хуже 1% при нагрузке $I \leq 100$ А. Длительность импульсов 500 мкс, частота следования импульсов 10 Гц. Измерение зондовых характеристик проводилось методом стробируемого

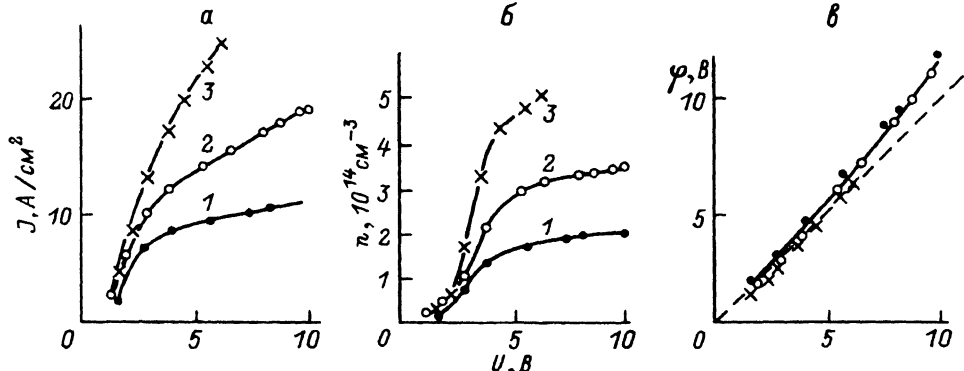


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики и зависимости параметров плазмы от напряжения.

$p_{\text{Cs}} = 10^{-2}$ Тор; $p_{\text{H}_2} = 1$ Тор, температура катода T_k (K): 1 — 1040, 2 — 1100, 3 — 1130.

интегрирования [12] на плато разрядного импульса. Временное разрешение ≈ 1 мкс.

3. Экспериментальные результаты представлены на рис. 2. На рис. 2, а, б приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и соответствующие им зависимости концентрации n плазмы от приложенного напряжения U . Параметры плазмы определялись из результатов зондовых измерений. Для обработки эксперимента, как показали оценки, можно было использовать теорию бесстолкновительного зонда. Приведенные данные соответствуют нескольким значениям температуры T_k катода при фиксированных давлении $p_{\text{H}_2} = 1$ Тор и температуре цезиевого резервуара, соответствующей давлению цезия над жидкой фазой $p_{\text{Cs}} = 10^{-2}$ Тор. В рабочей области напряжений, соответствующей рис. 2, а и б, плазма в зазоре образуется за счет ионизации Cs. Видно, что по мере увеличения U концентрация n плазмы имеет тенденцию к насыщению, что указывает на переход плазмы в полностью ионизованное состояние аналогично тому, что имело место в НР в парах Cs при низких давлениях $p_{\text{Cs}} = 10^{-3} - 10^{-2}$ Тор [13]. Однако в противоположность разряду в чистом Cs измеряемая таким образом полная концентрация цезия $N_{\text{Cs}}^{(0)}$ существенно возрастает при небольшом увеличении температуры T_k катода. Увеличению $N_{\text{Cs}}^{(0)}$ соответствует увеличение тока эмиссии j_{es} . Отметим, что в чисто цезиевом разряде указанные эффекты не имеют места [13]. Возможно, что увеличение концентрации Cs в разряде объясняется разложением на поверхности катода гидрида цезия или спецификой процессов адсорбции-десорбции Cs на поверхности в атмосфере водорода. Вполне возможно, что концентрация $N_{\text{Cs}}^{(0)}$ в прикатодной области увеличивается также по мере увеличения U и j вдоль ВАХ, которые при больших j_{es}^1 не имеют насыщения и заметно отличаются как от теоретических ВАХ Cs-H₂ разряда [5-7], так и от ВАХ чисто цезиевого разряда [13]. Эти вопросы потребуют дополнительного исследования.

¹ Токи эмиссии $j_{\text{es}} \sim 10$ А/см² реализовались в импульсных экспериментах. При измерениях на постоянном токе $j_{\text{es}} \lesssim 1$ АП/см².

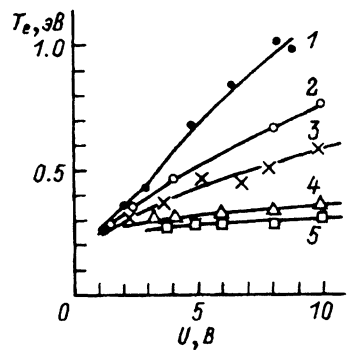


Рис. 3. Зависимость температуры электронов от напряжения на разряде и давления водорода. $p_{Cs}^* = 3 \cdot 10^{-2}$ Тор; p_{H_2} (Тор): 1 — 0.5, 2 — 1.0, 3 — 2.0, 4 — 4.0, 5 — 5.0.

На рис. 2,в приведена зависимость потенциала φ в рассматриваемой точке плазмы от напряжения U на разряде. Видно, что потенциал φ несколько превышает U , что в основном связано с наличием задерживающего электроны прианодного потенциального барьера в ленгмюровском слое.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость температуры T_e электронов от напряжения U при фиксированном p_{Cs}^* и различных p_{H_2} . Видно характерное уменьшение T_e в НР при возрастании p_{H_2} , связанное в основном с увеличением роли $e - v$ -обмена в энергетическом балансе электронов при больших концентрациях молекулярного водорода.

4. Остановимся на сравнении эксперимента с теорией. Экспериментальная картина состояния плазмы в НР в Cs-H₂ в общем хорошо соответствует теоретическим представлениям [5-7]. Имеет место, однако, систематическое занижение экспериментальных значений T_e по сравнению с расчетными. Это связано в основном с заметной ролью краевых эффектов в энергетическом балансе.²

При количественном сопоставлении эксперимента с теорией параметры расчета ток $j \simeq j_{es}$, полная концентрация $N_{Cs}^{(0)}$ цезия в зазоре брались из эксперимента. Величина $N_{Cs}^{(0)}$ определялась по величине концентрации n полностью ионизованной плазмы. Напряжение U на разряде выбиралось из условия совпадения экспериментального и расчетного значений φ при $x = 2$ мм. На рис. 4,а,б приведены распределения по зазору некоторых расчетных параметров плазмы и отмечены полученные в эксперименте величины T_e , φ и n . На рис. 4,в сравниваются расчетные и экспериментальные зависимости T_e (p_{H_2}) при постоянных остальных параметрах разряда, включая $H_{Cs}^{(0)}$.

Полученное разумное согласие теории с экспериментом позволяет рассчитывать на близость других параметров разряда к расчетным. Это относится и к концентрации N_{H^-} ионов H⁻ в разряде. При этом существенно, что вследствие малости длины рекомбинации ионы H⁻ должны находиться в состоянии ионизационно-рекомбинационного равновесия [7].

² Систематическое превышение теоретических значений T_e над экспериментальными наблюдалось и ранее в чисто цезиевом разряде (см., например, [14]). В Cs-H₂ разряде это обстоятельство более существенно, особенно при больших p_{H_2} , вследствие сильной колебательной накачки и большой теплопроводности молекулярного газа.

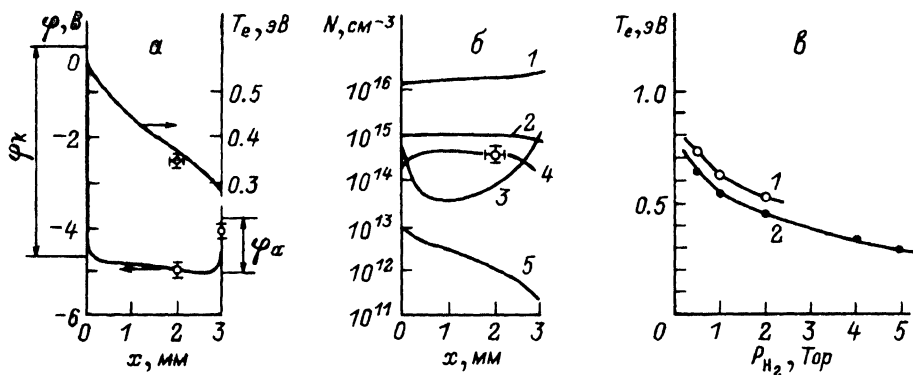


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений параметров плазмы $T_e(x)$; $\varphi(x)$ (а) и концентраций (б), а также экспериментальная и расчетная зависимости температуры электронов от давления водорода (в).

б: 1 — H_2 , 2 — H , 3 — Cs , 4 — n , 5 — H^- ; $j_{e3} = 18 \text{ A/cm}^2$, $N_{\text{Cs}}^{(0)} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $p_{\text{H}_2} = 3 \text{ Тор}$, $L = 3 \text{ см}$; в: 1 — расчет: $j_{e3} = 10 \text{ A/cm}^2$, $N_{\text{Cs}}^{(0)} = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_k = 7 \text{ В}$, $L = 5 \text{ мм}$; 2 — эксперимент: $j = 10 \text{ A/cm}^2$, $N_{\text{Cs}}^{(0)} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\varphi = 7 \text{ В}$, $L = 3 \text{ мм}$.

Поэтому их концентрация определяется только локальными значениями параметров плазмы T_e , n , N_{H} , N_{H_2} , N_{Cs} , что облегчает анализ экспериментальных данных и оптимизацию такого разряда. Конечно, остается весьма актуальным непосредственное экспериментальное определение концентрации ионов H^- в разряде.

Авторы благодарят Б.И.Циркеля за помощь в измерениях.

Список литературы

- [1] Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоатомиздат, 1981. 168 с.
- [2] Антипов С.П., Елизаров Л.И., Мартынов М.И., Чесноков В.М. // ПТЭ. 1984. № 4. С. 42-44.
- [3] Bacal M. // Nuclear Inst. and Methods in Phys. Research. 1989. N 37/38. P. 28-32.
- [4] Bacal M., Skinner D. // Comments At. Mol. Phys. 1990. Vol. 23. N 6. P. 283-299.
- [5] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 11. С. 672-676.
- [6] Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г., Юрьев В.Г. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 1. С. 91-97.
- [7] Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 7. С. 854-861.
- [8] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 3. С. 286-293.
- [9] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 195-200.
- [10] Wadera J.M. // Phys. Rev. A. 1983. Vol. 29. N 1. P. 106-110.
- [11] Моргулис Н.Д., Клапченко В.И. // УФЖ. 1976. Т. 21. № 2. С. 181-185.
- [12] Бакшт Ф.Г., Дюжев Г.А., Циркель Б.И. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 8. С. 1623-1629.
- [13] Дюжев Г.А., Мойжес Б.Я., Старцев Е.А., Юрьев В.Г. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 11. С. 2393-2405.
- [14] Дюжев Г.А., Каплан В.Б., Мойжес Б.Я., Юрьев В.Г. // ЖТФ. 1971. Т.41. Вып. 1. С. 453-456.

Физико-технический институт
им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
14 августа 1991 г.