

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Д. П. Грдличко, В. Б. Сахаров, Зондовые и спектральные измерения параметров плазмы дугового разряда с полым катодом, *ТВТ*, 1978, том 16, выпуск 4, 693–698

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.239.90.61

11 ноября 2024 г., 00:38:47



УДК 533.9.082.76:5

ЗОНДОВЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Грдличко Д. П., Сахаров В. Б.

Приводятся новые экспериментальные данные о параметрах плазмы в полом катоде, полученные зондовым и спектральным методами. Исследованы распределения потенциала плазмы, температуры и концентрации электронов, а также температуры атомов и ионов в полости катода. Результаты измерения концентрации электронов зондовым и спектральными методами хорошо согласуются между собой. Высокая температура ионов ($T_i \approx 1..3,5$ эВ) объясняется колебаниями ионной компоненты плазмы в выходном отверстии катода.

В настоящее время дуговой разряд с полым катодом находит широкое применение в технике как источник плотной плазмы. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию разряда с полым катодом, картина физических процессов в этом разряде из-за ограниченности информации о параметрах плазмы в полости катода остается неясной.

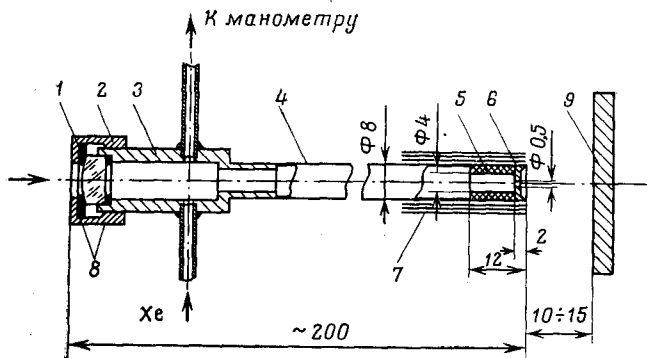


Рис. 1. Схема разрядного устройства: 1 — конденсор; 2 — накидная гайка; 3 — корпус; 4 — танталовая трубка; 5 — эмиттер (LaV_6); 6 — дно катода; 7 — экран; 8 — уплотнения; 9 — анод

В данной работе приводятся результаты зондовых и спектральных измерений параметров плазмы во внутреннем положительном столбе дугового разряда с полым катодом в ксеноне.

Схема исследованной модели полого катода представлена на рис. 1. Горез катода закрыт шайбой из лантанированного вольфрама с небольшим отверстием в центре диаметром 0,5 мм. В полость катода вставлен миттер из гексаборида лантана в виде полого цилиндра. Размеры эмиттера $\text{diam. } 7,8/4 \times 10$ мм. Для обеспечения хорошей тепловой развязки корпус катода выполнен из тонкостенной танталовой трубки, которая прикрепляется к вспомогательному корпусу. Вспомогательный корпус снабжен двумя

штудерами, по одному из которых осуществлялась подача газа в разряд, другой использовался для измерения давления газа в полости с помощью масляного манометра. На торце вспомогательного корпуса при спектральных измерениях устанавливался конденсор, который позволял получать увеличенное изображение полости катода. При измерении температуры дна катода оптическим пирометром конденсор заменялся на кварцевое стекло. При зондовых измерениях катод крепился на специальном координатнике, с помощью которого в полость катода вводились электрические зонды. Зажигание разряда осуществлялось подачей импульса высокого напряжения на вспомогательный электрод, расположенный перед торцом

Рис. 2. Зависимость температуры стенки полости катода и давления в катоде от тока разряда при расходе ксенона: 1 — 0,1 мг/с; 2 — 0,2

Рис. 3. Распределение потенциала изолированного зонда, температуры и концентрации электронов вдоль оси полости катода ($I=4,2$ А; $p=3,2$ кПа)

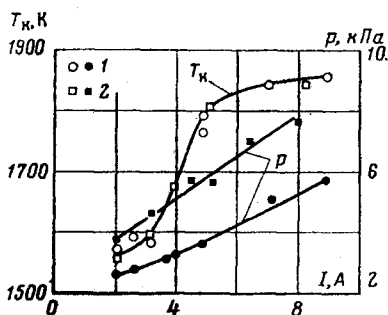


Рис. 2

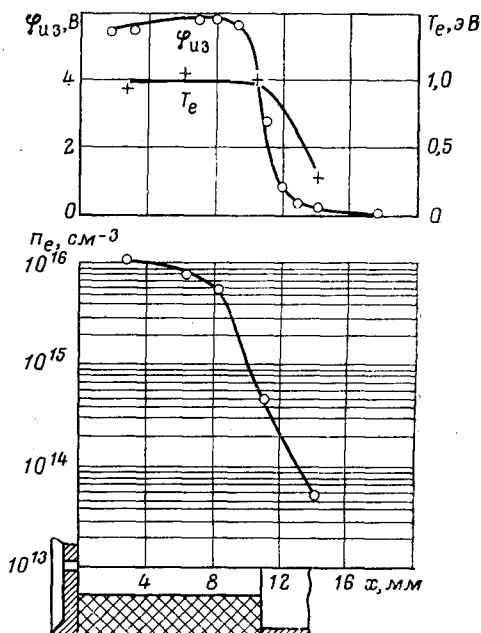


Рис. 3

катода. Температура корпуса катода контролировалась вольфрам-ренийевой термопарой. Испытания проводились в вакуумной камере при давлении $6,5 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Параметры плазмы в полости катода измерялись в нескольких точках вольт-амперной характеристики при расходах ксенона $\dot{m}=0,1$ и $0,2$ мг/с, а также при постоянном токе разряда $I_p=4,2$ А в диапазоне давлений в полости катода $p_k=1,3-8$ кПа. Напряжение разряда составляло $20-40$ В. Температура внутренней стенки полости катода T_k измерялась оптическим пирометром. При изменении тока разряда I_p от 2 до 9 А T_k увеличивалась с 1550 до 1850 К. Изменение расхода Хе через катод при постоянном токе разряда слабо влияло на T_k . Зависимость температуры стенки полости катода и давления в катоде от тока разряда для расходов ксенона через катод 0,1 и 0,2 мг/с показана на рис. 2.

Картина разряда, наблюдаемая со стороны полости, оставалась неизменной во всем исследованном диапазоне расходов Хе и токов разряда. Наблюдалось интенсивное свечение плазмы в выходном отверстии катода и менее интенсивное свечение от плазмы, заполняющей остальной объем катода.

При измерении параметров плазмы с помощью зонда последний вводился с тыльной стороны катода вдоль его оси. Измерения проводились цилиндрическими зондами диаметром $0,1-0,35$ и длиной 2 мм. Вследствие технических трудностей зондовые измерения проводились в небольшом объеме,

а именно при одном токе разряда $I_p=4,2$ А и в небольшом диапазоне давлений $p_k=3,2-4,5$ кПа. Для определения параметров плазмы по зондовым характеристикам использовалась методика, предложенная в [1], в которой обоснована возможность использования зондового метода в случае, когда длина свободного пробега частиц меньше размеров зонда.

Температура электронов T_e определялась по наклону зондовой характеристики в полулогарифмическом масштабе вблизи потенциала изолированного зонда, а концентрация n_e — по ионной части зондовой характеристики с использованием точек, достаточно далеких от потенциала изолированного зонда, для которых произведение концентрации на температуру электронов определяется выражением [1]

$$n_e T_e = 2 \cdot 10^{12} \frac{a}{\lambda_+} \sqrt{A T_{sj}} \ln \frac{l}{\alpha \lambda_0}, \quad (1)$$

где A — атомный вес, j — плотность ионного тока на зонд (мА/см^2), a — радиус зонда, l — длина зонда, λ_+ — длина свободного пробега ионов, λ_0 — безразмерное расстояние от зонда до границы области квазинейтральности плазмы, равное

$$\lambda_0 = (1+u)(1+\alpha u). \quad (2)$$

Для цилиндрического зонда $\alpha=0,05$, а u определяется выражением

$$u = 2,3 \cdot 10^{-2} \left(\frac{V_1 \lambda_+}{j_+ A} \right)^{1/2} \frac{1}{a}. \quad (3)$$

Здесь V_1 — потенциал плазмы относительно зонда.

При определении концентрации электронов температура атомов T_a принималась равной температуре стенки катода, а длина свободного пробега ионов определялась по сечению резонансной перезарядки ($\lambda_+ = I/Q_n n_a$).

Распределение потенциала изолированного зонда $\Phi_{из}$, T_e и n_e вдоль оси полости катода при $I_p=4,2$ А и $p_k=5,6$ кПа, полученные с помощью зондов, показано на рис. 3. Как видно из рис. 3, область, занимаемая плазмой, приблизительно совпадает с размерами эмиттера. При этом параметры плазмы слабо изменяются по этой области и резко изменяются на ее границах. Потенциал плазмы, оцененный по потенциалу изолированного зонда, равен ≈ 11 В.

Спектральная диагностика параметров плазмы в полости катода включала определение температуры тяжелых частиц T_a и T_i и концентрации электронов n_e по уширению спектральных линий. Использовалась фотоэлектрическая регистрация спектральных линий. Исследование формы и ширины линий ксенона проводилось с помощью эталона Фабри — Перо ИТ-51-30, сканируемого давлением. Исследуемая линия выделялась монохроматором МДР-3, причем в качестве входной щели монохроматора использовалась круглая диафрагма диаметром $\sim 0,25$ мм. В эталоне устанавливались зеркала с многослойными диэлектрическими покрытиями с коэффициентом отражения $\sim 0,93$ в рабочей области 430–520 нм. Для исключения влияния нелинейности изменения давления со временем использовался тензометрический датчик давления с металлическими наклеиваемыми тензорезисторами, сигнал от которого подавался на x -координату двухкоординатного потенциометра ПДС-021. Измерение светового потока осуществлялось методом синхронного детектирования с предварительной модуляцией светового потока. Световой сигнал принимался фотоумножителем ФЭУ-79, фототок через истоковый повторитель подавался на узкополосный усилитель У2-6 и затем на преобразователь напряжения В9-2. Частота модуляции 1 кГц. Аппаратная функция всей системы определялась по линиям ХеI в струе плазмы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. При этом использовалась толщина эталона Фабри — Перо 0,6 мм. Как показали оценки, в этих условиях аппаратная ширина зна-

чительно превышает доплеровскую. Аппаратная ширина, измеренная по линии XeI 480,7 нм, оказалась равной 0,024 доли порядка. Время сканирования одного интерференционного порядка не превышало 5 мин.

При предварительном фотографировании спектров плазмы в разряде с полым катодом спектрографом ИСП-51 было обнаружено, что линии атомарного ксенона возбуждаются в полости катода и практически отсутствуют в выходном отверстии катода, где в основном излучаются только ионные линии. В спектре плазмы разряда наблюдались только линии XeI и XeII .

Наблюдение плазмы при спектральных исследованиях проводилось в основном вдоль оси разряда. При исследовании зависимостей параметров плазмы от давления газа наблюдения велись и при $r \neq 0$ также по направлениям, параллельным оси. Некоторые контрольные измерения проводились в направлении, перпендикулярном оси разряда, в столбе разряда между катодом и анодом.

Диагностика плазмы проводилась по линиям: XeI 462,4; 473,4; 480,7 нм и XeII 433,0; 446,2; 460,3; 541,9 нм. Линия XeI 462,4 нм обладает большим штарк-эффектом, объясняющимся сильным возмущением близко расположенного к уровню $7p$ $[3/2]_2$ уровня $6d$ $[3/2]_2$. Из известных значений $[2-4]$ констант квадратичного штарк-эффекта было выбрано экспериментальное значение $C_4 \approx 9 \cdot 10^{-13}$ см⁴/с [4]. Зависимость полуширин линий XeI 473,4 и 480,7 нм от концентрации электронов находилась расчетным путем при учете как упругих, так и неупругих соударений атомов с электронами и ионами [5], силы осцилляторов при этом определялись в кулоновском приближении по таблицам [6]. Температура электронов оценивалась из зондовых измерений.

Различные оценки показывают, что температура атомов в полем катоде не превышает 3000–5000 К. При этом полуширина доплеровской части контура свертки примерно в 5–10 раз меньше штарковской части для линии XeI 462,4. Поэтому доплеровскую часть из свертки можно было извлечь только при низких давлениях разряда. Последовательный анализ зарегистрированных контуров атомарных линий в этих режимах разряда позволил получить удовлетворительные значения как концентрации электронов, так и температуры атомов в плазме. В ряде случаев, когда контуры атомных линий по различным направлениям наблюдения записывались на одну регистраграмму, концентрация электронов находилась как по уширению, так и по сдвигу линий.

Аналогичный расчет показывает, что в случае ионных линий ксенона штарковские константы очень малы и даже для ожидаемых концентраций электронов дают существенно меньшие доплеровских значения полуширины. Таким образом, при анализе контуров ионных линий штарковским уширением пренебрегалось и контур считался чисто доплеровским.

Возможное уширение нейтральными частицами оценивалось теоретически [5]: при $n_a \sim 10^{17}$ см⁻³ полуширина контура линии, уширенной нейтральными частицами, на два порядка меньше штарковского уширения. Реабсорбция линий проверялась как экспериментально путем просвечивания исследуемого источника излучением от эталонной лампы СИ-10-300, так и расчетным путем [7]. Оказалось, что поглощение в центре линии для всех исследуемых линий не превышает 1%.

Как и во всех измерениях по доплеровскому уширению спектральных линий, ошибки в экспериментальных значениях температуры тяжелых частиц не превышают 25–30%, что касается точности измерений n_e , она определяется погрешностями применяемых значений штарковских констант C_4 и лежит в пределах 40%.

Результаты спектральных измерений приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4 показаны зависимости усредненных по линии наблюдения вдоль эмиттера концентраций электронов n_e и температуры ионов T_i от давления в полости катода при постоянном токе разряда ($I_p = 4,2$ А), на рис. 5 —

зависимости этих же величин от тока разряда при постоянном расходе газа через катод. Результаты измерений, приведенные на рис. 4, получены при наблюдении как вдоль оси катода, так и по периферийным направлениям, параллельным оси катода. Данные рис. 5 получены при наблюдении вдоль оси катода.

Как видно из рис. 4, с повышением давления наблюдается небольшой рост n_e , причем при одних и тех же давлениях осевые наблюдения дают меньшие значения n_e , чем периферийные. Параметры контуров атомных

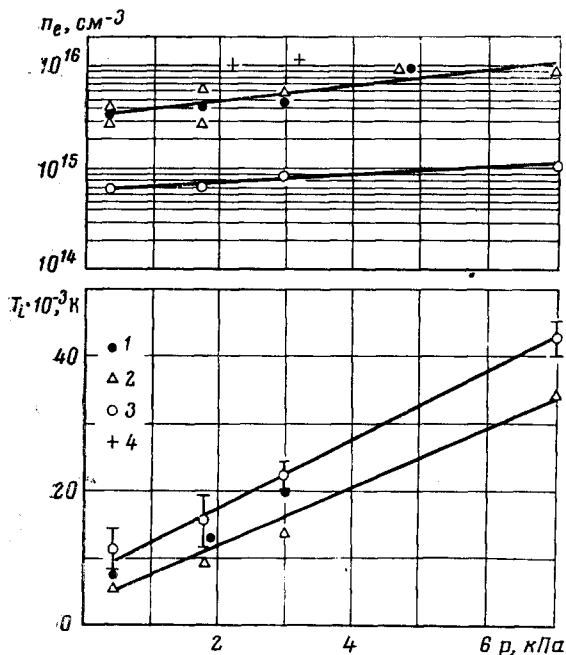


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов и температуры ионов в полости катода от давления при $I=4,2$ А: 1, 2 – периферийные наблюдения; 3 – наблюдения вдоль оси катода; 4 – осевые зондовые измерения

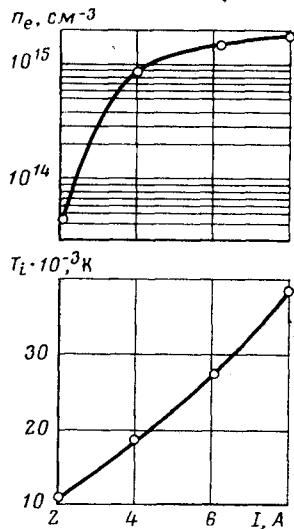


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов и температуры ионов в полости катода от тока разряда (наблюдение вдоль оси катода, $\dot{m}_{Xe}=0,2$ мг/с)

линий при периферийных наблюдениях в пределах погрешности измерений не зависят от местоположения линии наблюдения. Это указывает на то, что в полости катода концентрация электронов в плазме слабо изменяется по радиусу. Снижение же средней концентрации при наблюдении вдоль оси катода связано с тем, что в поле зрения системы регистрации попадает излучение от зоны отверстия и пространства между катодом и анодом. При этом интенсивность контура линий XeI при осевом наблюдении существенно превышает интенсивность периферийных контуров, и его можно рассматривать как сумму от сложения широкого контура плотной плазмы в полости катода и узкого контура от разреженного слоя в области отверстия катода. Суммарный контур по сравнению с локальным штарковским той же ширины имеет суженную верхнюю часть и более широкие крылья. Уменьшение полуширины суммарного контура линии при осевом наблюдении связано с тем, что узкий контур от разреженного слоя главным образом увеличивает интенсивность вершины контура более плотного слоя. Таким образом, при наблюдении вдоль оси регистрируется n_e , более близкая к концентрации разреженного слоя в зоне отверстия катода.

Значения n_e , полученные спектральным методом, подтверждаются зондовыми измерениями. Для сравнения на рис. 4 приведены результаты зондовых измерений, проводившихся на оси катода,

С ростом тока разряда концентрация электронов в плазме полого катода возрастает, причем зависимость n_e от тока разряда более сильно выражена, чем зависимость от давления.

Температура ионов T_i увеличивается как с ростом давления при постоянном токе, так и при увеличении тока разряда при постоянном расходе ксенона через катод. При повышении давления в полости катода от 1,33 до 8,0 кПа наблюдается рост T_i примерно в пять раз. В такой же мере T_i возрастает при увеличении разрядного тока от 2 до 8 А, причем осевые измерения дают большие значения температуры ионов, чем периферийные. Измеренная величина температуры атомов T_a при давлениях 1,33–4,0 кПа составляет (1600 ± 300) К.

Существенной особенностью полученных данных о температуре ионов в полом катоде является аномально большая величина T_i (1–3,5 эВ). Наличие аномально высокой ионной температуры в зоне отверстия катода подтверждается и контрольными измерениями, проведенными в направлении, перпендикулярном оси разряда за выходным отверстием катода. Вблизи дна катода полуширина контуров ионных линий близка к значениям, получаемым при осевых измерениях. При удалении от катода в сторону анода ионный контур сужается.

Полученные значения T_i превышают температуру электронов (рис. 2), что возможно в тех случаях, когда основным источником нагрева является диссипация энергии, связанная с движением плазмы (ударные волны, сильные колебания), когда большая часть тепла выделяется в ионном газе [8, 9]. Очевидно, этот случай реализуется в дуговом разряде с полым катодом, на что указывает, например, сильная зависимость T_i от давления в полости катода. Действительно, как показали зондовые измерения, в полости катода электрическое поле практически постоянно, и плазма за счет градиента давления с ускорением вытекает из отверстия катода. На выходе же из катода, где резко падает плотность плазмы, возникает скачок потенциала [10]. При этом электрическое поле является преградой только для ионной компоненты, поэтому в этой зоне могут возникнуть сильные колебания ионной компоненты плазмы, диссипация энергии в которых приводит к росту температуры ионов.

Москва

Поступила в редакцию
3 XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Захарова и др. ЖТФ, 30, № 4, 442, 1960.
2. A. Lesage, J. Richou. JQSRT, 12, № 9, 1313, 1972.
3. Л. В. Горчакова, А. М. Янчарина, И. И. Муравьев. Изв. вузов, Физика, № 7, 30, 1972.
4. S. Pranoto, P. Schulz. Beitrage Plasmaphys., 5, 445, 1965.
5. И. И. Собоelman. Введение в теорию атомных спектров. Физматгиз, 1963.
6. Л. А. Вайнштейн, И. И. Собоelman, Е. А. Юков. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. «Наука», 1973.
7. В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустель, А. В. Северный, В. В. Соболев. Теоретическая астрофизика. ГИТТЛ, 1952.
8. С. И. Брагинский. В сб. Вопросы теории плазмы, вып. 1. Атомиздат, 1963.
9. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. «Наука», 1968.
10. В. Л. Грановский. Электрический ток в газе. «Наука», 1971.