

## Определение напряженности электрического поля на боковой поверхности катода в тлеющем разряде в гелии при атмосферном давлении

П.А. Иванова,\* А.В. Казак, Л.В. Симончик, Н.В. Томкович

*Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси*

*Беларусь, 220072, Минск, пр. Независимости, д. 68-2*

(Поступила в редакцию 06.06.2024; подписана в печать 03.10.2024)

Зарегистрированы контуры линии HeI 492.2 нм, образованные штарковскими  $\sigma$ -компонентами в области катодного падения потенциала на боковой поверхности катода. Разработан спектрополяризационный метод определения напряженности электрического поля с помощью контура линии HeI 492.2 нм, образованного штарковскими  $\sigma$ -компонентами. Получено пространственное распределение напряженности электрического поля в слое катодного падения потенциала на боковой поверхности катода, которое имеет линейный характер по мере удаления от разрядного промежутка.

PACS: 52.70.-m, 52.80.Nc.

УДК: 533.9:51-73

Ключевые слова: самостоятельный нормальный тлеющий разряд атмосферного давления, область катодного падения потенциала, эмиссионная штарковская спектроскопия, физика плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

Тлеющие разряды атмосферного давления (ТРАД) используются во многих технологических приложениях [1, 2]. В этом случае упрощается эксплуатация установок и уменьшается их стоимость. Тлеющий разряд на постоянном токе является простейшим из них. Катодная область играет ключевую роль в тлеющем разряде. Протекающие в ней процессы определяют свойства и стабильность данного разряда [2, 3]. Все это делает необходимым проведение детальных исследований катодной области.

Одним из факторов, влияющих на процессы в катодной области, является неплоская форма катода. Такая ситуация возникает, когда плоской поверхности катода не хватает для растекания катодной области поперек разряда при увеличении тока и она выходит на боковую поверхность катода. В разрядных установках часто используют электроды с отверстиями или сетки-электроды, через которые протекает разрядный ток. При атмосферном давлении растекание катодной области на боковую поверхность катода происходит в сильном точном разряде.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИКА

Для оптико-спектроскопических измерений характеристик ТРАД использовалась автоматизированная система регистрации, преобразования и хранения данных, блок-схема которой приведена на рис. 1, а, аналогично [3].

При использовании стержневого катода область катодного падения потенциала переходит на боковую

поверхность, когда ее недостаточно для расположения области катодного падения потенциала (рис. 1, б). В эксперименте использовался стержневой неохлаждаемый медный катод цилиндрической формы.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 2.1. Формирование контура линии HeI 492.2 нм

Для атома гелия, находящегося в электрическом поле, имеет место квадратичный эффект Штарка. В этом случае наблюдается нелинейная зависимость интенсивности и смещения штарковских компонент от величины поля. Расчет контуров выполнялся с использованием численных массивов данных для смещений и интенсивностей штарковских  $\pi$ - и  $\sigma$ -компонент в зависимости от напряженности электрического поля [4, 5]. Полное электрическое поле может быть представлено в виде суммы постоянной и флуктуирующей составляющих поля. Тогда, согласно статической теории, если существует распределение  $f(E)$  соответственно нормализованных статических полей, то все штарковские компоненты будут иметь вид, определяемый этим распределением, связанный со смещением  $\Delta\lambda$  и напряженностью электрического поля  $E$ . В этом случае справедливо соотношение:

$$S(\lambda)\Delta\lambda \sim f(E)\Delta E, \quad (1)$$

где  $f(E)$  — функция распределения флуктуаций электрического поля,  $S(\lambda)$  — распределение интенсивности в соответствующей части спектра  $\Delta\lambda$ .

Распределение флуктуаций:

$$f_L(E) \sim \left[1 + (E - E_0)^2 / (E_{\sim})^2\right]^{-1} \quad (2)$$

где  $E_0$  — постоянная составляющая напряженности электрического поля,  $E_{\sim}$  — флуктуирующая составляющая напряженности электрического поля.

\* p123456ivanova@yandex.by

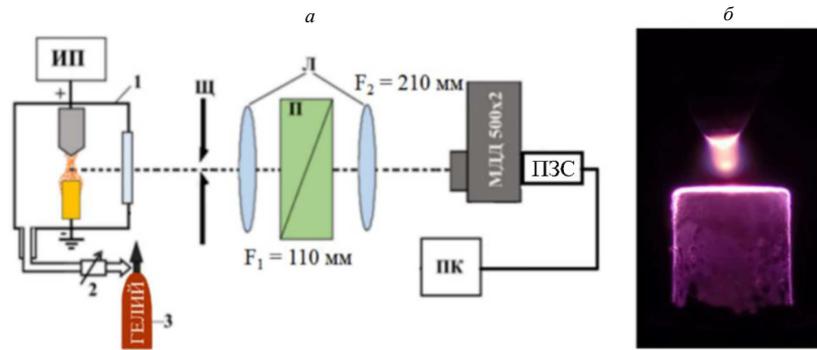


Рис. 1. *a* — Блок-схема экспериментальной установки опико-спектрокопических измерений: 1 — разрядная камера, 2 — регулятор расхода газа, 3 — баллон с газом, ИП — источник питания разряда, Щ — щель, Л — линза, П — поляризатор, МДД 500x2 — монохроматор; ПЗС — камера iStarAndor; ПК — персональный компьютер; А — анод; К - катод; *б* — разряд в гелии

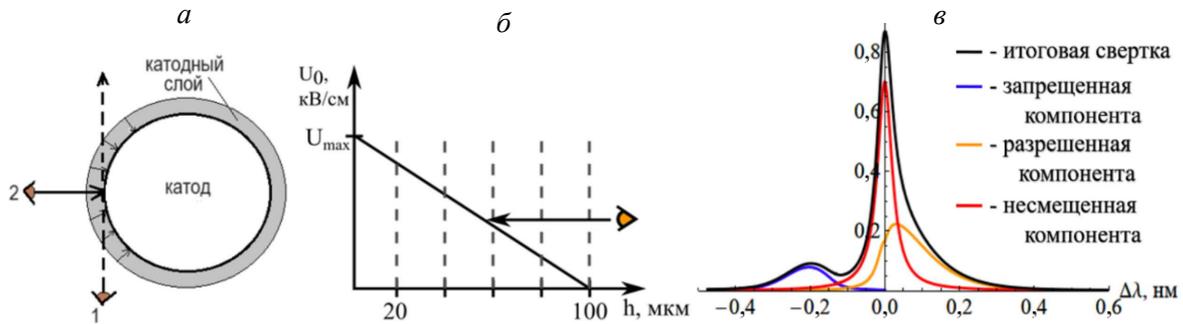


Рис. 2. Схема наблюдения при регистрации излучения у поверхности катода (*a*, *б*), результирующий контур (*в*)

Тогда нормализованные профили линии для  $\sigma$ -компонент ( $S_{\sigma}^{\sim}(\lambda)$ ) можно записать в следующем виде:

$$S_{\sigma}^{\sim}(\lambda) = \sum_i \beta_{\sigma i}(E) f(E) \Delta\lambda'_{0\sigma i}(E) / \Delta\lambda'_{\sigma i}(E), \quad (3)$$

где  $\Delta\lambda'_{\sigma i}$  — производная штарковского смещения  $\sigma$ -компонент с номером  $i$  в напряженности поля  $E$ ;  $\Delta\lambda'_{0\sigma i}$  — значение производной при постоянной составляющей напряженности поля;  $\beta_{\sigma i}$  — относительные интенсивности штарковских  $\sigma$ -компонент.

## 2.2. Пространственное распределение напряженности электрического поля

Напряженность электрического поля в катодной области ТРАД в гелии определялась с помощью метода штарковской поляризационной спектроскопии по контурам линии HeI 492.2 нм. Параметры эксперимента: ток разряда 1 А, расход гелия 1 л/мин, разрядный промежуток 5 мм, входная щель монохроматора 20 мкм.

Расчет для контура линии гелия 492.2 нм, образованного  $\pi$ -компонентами, проводился по программе, разработанной ранее [4]. Для контура линии, обра-

зованного  $\sigma$ -компонентами, эта программа была модифицирована с учетом зависимостей интенсивностей и смещений этих компонент от напряженности электрического поля. При расчете результирующего контура была добавлена третья несмещенная компонента с лоренцевским контуром. Эта компонента появляется вследствие того, что входная апертура монохроматора не бесконечно малая, поэтому регистрируется излучение из областей, где электрическое поле мало или отсутствует. Наблюдение вдоль касательной к поверхности (рис. 2, *a*, штриховая линия 1), как в случае плоского катода, в этом случае не совсем корректно, т.к. ввиду цилиндрической симметрии поляризатором невозможно выделить только эти компоненты. При наблюдении перпендикулярно касательной к поверхности катода (рис. 2, *a*, линия 2) регистрироваться будут только  $\sigma$ -компоненты. Но излучение будет интегральным по всей толщине катодного слоя и будет накладываться излучение отрицательного свечения (рис.2, *б*). В программу было добавлено суммирование по толщине катодного слоя (рис.2, *б*).

Результирующий контур получается путем свертки трех компонент: несмещенной, разрешенной и запрещенной в виде лоренцевских контуров (рис. 2, *в*). Для определения напряженности электрического поля на

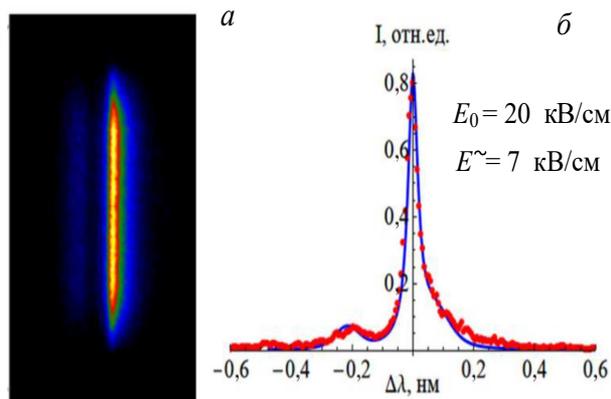


Рис. 3. Схема регистрации контура на боковой поверхности катода при наблюдении перпендикулярно оси разряда (а), полученный результирующий контур (б)

боковой поверхности катода была проведена регистрация контура линии HeI 492.2 нм. Схема регистрации представлена на рис. 3, б. В этом случае излучение регистрируется по всей толщине слоя катодного падения потенциала, где поле изменяется от максимального значения у поверхности до нуля (рис. 2, б).

Рассчитанный контур линии гелия с боковой поверхности катода, полученный суммированием контуров для напряженностей от 0 до  $U_0$ , представлен на рис. 3, б. Соответствие расчетного и экспериментального контуров достигалось подбором трех параметров: величин постоянной ( $E_0$ ) и флуктуирующей ( $E\sim$ ) составляющих напряженности электрического поля, а также амплитуды несмещенной составляющей контура линии. Полученное распределение напряженности электрического поля вдоль боковой поверхности стержневого катода представлено на рис. 4.

Видно, что напряженность поля уменьшается практически линейно по мере удаления от разрядного промежутка от около 20 кВ/см, что приблизительно соответствует напряженности поля на краю катодного слоя в случае плоского горячего катода [6]

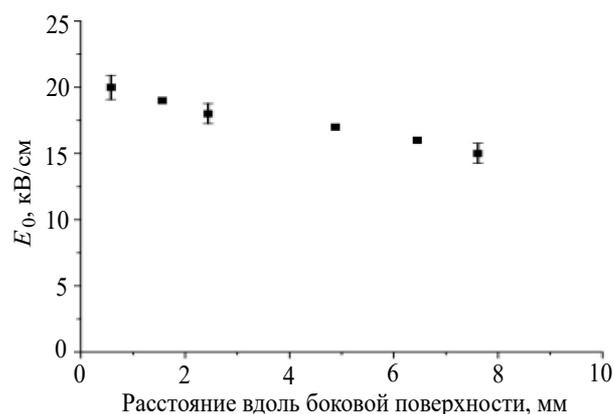


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля вдоль боковой поверхности катода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован самостоятельный нормальный тлеющий разряд с неплоским (стержневым) катодом на постоянном токе 1 А в гелии при атмосферном давлении, характеризующийся растеканием катодной области на боковую поверхность катода. Разработан метод определения электрического поля с помощью контура линии HeI 492.2 нм, образованного штарковскими  $\sigma$ -компонентами на боковой поверхности катода по всей толщине катодного слоя. Получено распределение напряженности электрического поля вдоль боковой поверхности катода. По распределению видно, что напряженность поля уменьшается практически линейно по мере удаления от разрядного промежутка. Полученные результаты будут использованы при построении численной модели катодного слоя на боковой поверхности катода.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ (гранты Ф22ТЮБ-003 и Ф24МП-017).

[1] Bogaerts A. // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. **14**, N 9. 1375 (1999).  
 [2] Ажаронок В.В. и др. Спектроскопия плазмы и природных объектов. Минск: Белорусская наука, 2007.  
 [3] Simonchik L.V., Kazak A.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 024004 (2019).

[4] Arkhipenko V.I., Zgiroukii S.M., Konjevic N. et al. // J. Appl. Spectrosc. **60**, N 5. 910 (2000).  
 [5] Kuraica M.M., Konjevic N., Videnovic I.R. // Spectrochim. Acta. Pt. B. **52**, N 6. 745 (1997).  
 [6] Simonchik L. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. **33**, 025014 (2024).

## Determination of the electric field strength on the side surface of the cathode in a glow discharge in helium at atmospheric pressure

P.A. Ivanova<sup>a</sup>, A.V. Kazak, L.V. Simonchik, M.U. Tomkavich

*B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus. Minsk, 220072, Belarus*

*E-mail: <sup>a</sup>p123456ivanova@yandex.by*

The contours of the HeI 492.2 nm line formed by Stark  $\sigma$ -components in the region of the cathode potential drop on the side surface of the cathode were recorded. A spectropolarization method has been developed for determining the electric field strength using the HeI 492.2 nm line contour formed by Stark  $\sigma$ -components. The spatial distribution of the electric field strength in the layer of cathode potential drop on the side surface of the cathode was obtained, which is linear with the distance from the discharge gap.

PACS: 52.70.-m, 52.80.Hc

*Keywords:* independent normal glow discharge of atmospheric pressure, region of cathode potential drop, Stark emission spectroscopy, plasma physics.

*Received 06 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Иванова Полина Александровна — студентка магистратуры, мл. науч. сотрудник; тел.: +375(17)270-83-30, e-mail: p123456ivanova@yandex.by
2. Казак Александра Витальевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, тел.: +375(17)270-80-54, e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by.
3. Симончик Леонид Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, тел.: +375(17)249-16-41, e-mail: l.simonchik@ifanbel.bas-net.by.
4. Томкович Николай Владимирович — аспирант, мл. науч. сотрудник, тел.: +375(17)270-80-54, e-mail: m.tomkavich@ifanbel.bas-net.by.