

УДК 533.9.082
EDN: VTGWSG

PACS: 52.70.-m

Методика анализа интерференционных картин в двухволновой интерферометрии лидерных каналов атмосферных разрядов© П. К. Батраков^{1*}, И. С. Байдин¹, А. А. Родионов¹, Я. К. Болотов¹, Ф. К. Гасратов¹,
П. А. Старовойтова^{1,2}, М. А. Медведев¹, Ю. К. Куриленков³, А. В. Огинов¹¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*E-mail: p.batrakov@lebedev.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 109028 Россия³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

Статья поступила в редакцию 17.07.2026; после доработки 28.07.2026; принята к публикации 22.10.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9.

Представлена методика исследования пространственной структуры лидерных каналов атмосферных газовых разрядов. На основе цифровой обработки интерферограмм, включающей автоматическое выделение центров полос, обратное преобразование Абеля и радиально-базисную интерполяцию, детально реконструированы двумерные карты пространственного распределения электронной плотности. Выявлены характерные особенности радиальной структуры и градиентов плотности в каналах разряда, подтверждающие высокую устойчивость предложенного комплексного подхода к диагностике нестационарной плазмы. Совокупность представленных результатов подтверждает, что разработанная методика применима к лабораторным атмосферным разрядам.

Ключевые слова: двухволновая интерферометрия, атмосферный электрический разряд.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-53-60

Введение

Изучение процессов, сопровождающих развитие атмосферных разрядов в контролируемых лабораторных условиях, имеют фундаментальное значение для понимания природы электрических разрядов в атмосфере. Количественная диагностика быстропротекающих явлений на микро- и наносекундных временных масштабах требует применения высокоточных методов, обеспечивающих одновременно высокое пространственное и временное разрешение [1–6].

Одним из эффективных методов диагностики плазменных каналов является двухволновая интерферометрия [7]. В основе метода лежит регистрация фазовых сдвигов когерентного излучения, обусловленных его взаи-

модействием с плазменной средой. Анализ интерференционной картины позволяет определять локальные изменения показателя преломления, что даёт прямую информацию о пространственном распределении плотности исследуемых объектов [8–10]. За счёт использования двух длин волн удаётся компенсировать ряд систематических ошибок, существенно повышая точность восстановления плотности плазмы.

В данной работе представлена методика комплексной обработки интерферометрических данных, полученных в ходе двухволновой диагностики плазмы. Вычислительный подход основан на выделении интерференционных полос, применении обратного преобразования Абеля и последующей реконструкции пространственных карт электронной плот-

ности. Полученные результаты позволяют детально описать пространственную конфигурацию плазменных неоднородностей в лидерных каналах и дают новые возможности для анализа физических процессов, лежащих в основе формирования атмосферных электрических разрядов.

Схема эксперимента

Для генерации высоковольтного атмосферного разряда в лабораторных условиях использовалась установка с генератором импульсного напряжения (ГИН), собранная по схеме Аркадьева–Маркса. Генератор включал 15 пар конденсаторов ИК-100-0.4 ёмкостью 0,4 мкФ каждый и напряжением 100 кВ. Общая запасённая энергия генератора составляла около 60 кДж. Длительность импульса составляла примерно 1 мкс при времени нарастания напряжения 120–220 нс. Максимальная амплитуда импульса достигала 1,2 МВ, а максимальный ток разряда 10–15 кА.

Длина разрядного промежутка составляла 55 см. Электродная система состояла из игольчатого катода с радиусом закругления 0,5 мм и полусферического анода из стальной сетки диаметром 9 см [9–12].

Для диагностики плазменного канала применялись методы двухволновой лазерной интерферометрии. Использовался Nd:YAG-лазер с длительностью импульса 7 нс и энергией 80 мДж на длинах волн $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 1064$ нм. Лазерный пучок направлялся через исследуемую область разрядного промежутка, а регистрация интерференционной картины осуществлялась с помощью интерферометра с воздушным клином (рис. 1) [9, 10].

Регистрация изображений выполнялась на цифровые CMOS-камеры с разрешением 5184×3456 пикселей и фильтром RGGB. Для инфракрасного диапазона $\lambda_2 = 1064$ фильтры IR-cut удалялись заранее. Пространственное разрешение в объектной плоскости составляло примерно 50 м/пиксель, а временное разрешение – 7 нс (рис. 1) [9, 10].

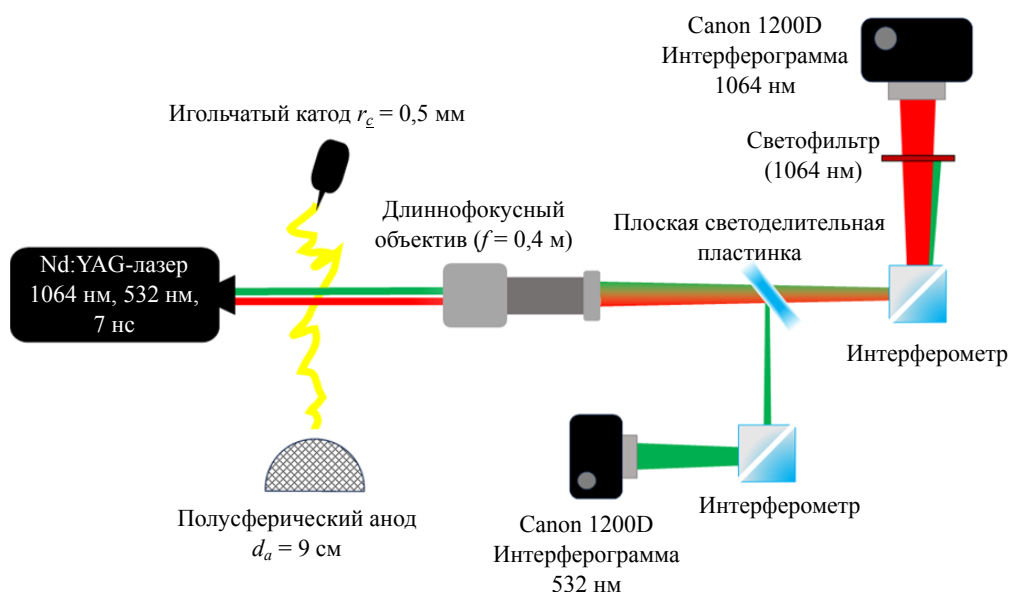


Рис. 1. Схема экспериментальной установки двухволновой лазерной интерферометрии для диагностики плазменного канала высоковольтного атмосферного разряда. Показаны направление распространения зондирующего излучения, интерферометры и система регистрации

Каждому эксперименту соответствовали две интерферограммы, одна на длине волн $\lambda_1 = 532$ нм, вторая – $\lambda_2 = 1064$ нм. Каждая интерферограмма представляла двумерную проекцию интегрального фазового сдвига, сформиро-

ванного вдоль направления распространения лазерного луча. Эти изображения использовались в разработанном алгоритме по обработке, локализации характерных точек и восстановления распределения электронной плотности.

Синхронизация момента зондирования с фазами развития высоковольтного разряда осуществлялась с помощью управляемого блока задержек. Импульс запуска от системы накачки Nd:YAG-лазера поступал на блок задержки, который с задержкой $\tau \approx 80$ мкс формировал сигнал поджига генератора импульсных напряжений. Такая схема обеспечивала открытие активного затвора лазера и генерацию 7-нс зондирующего импульса строго в заданный момент фазы развития разряда. Контроль временной привязки лазерного импульса к осциллограммам тока и напряжения выполнялся скоростным фотоприёмником.

Метод анализа интерференционных картин

Двухволновая интерферометрия является эффективным методом измерения электронной плотности n_e в лабораторных газовых разрядах [7, 9, 10, 13]. В отличие от интерферометрии на одной длине волны регистрация фазовых сдвигов δ на двух длинах волн $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 1064$ позволяет разделить вклады свободных электронов и тяжелых частиц (ионов и нейтральных частиц). В условиях эксперимента зондирующее излучение проходило через канал лидера вблизи катодной области, обеспечивая определение интегральной плотности электронов вдоль линии зондирования (рис. 1).

В приближении высокой частоты зондирующего поля $v_{ei}/f \ll 1$ связь измеряемого фазового сдвига δ с показателем преломления среды n и интегральной электронной плотностью вдоль линии зондирования y описывается следующими выражениями [7, 9, 10, 13]:

$$\delta(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \int (n(x, y) - 1) dx, \quad (1)$$

$$n(\lambda) - 1 = -4.46 \times 10^{-14} \lambda^2 n_e + 2\pi \sum_i N_i \alpha_i, \quad (2)$$

где N_i – концентрация частиц, а α_i – поляризуемость частиц i -го сорта. Учет данных уравнений для двух длин волн позволяет полностью исключить вклад ионно-нейтральной компоненты и учесть только электронную составляющую

$$\int n_e dx = \frac{\delta(\lambda_2)\lambda_2 - \delta(\lambda_1)\lambda_1}{4.46 \times 10^{-14} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}. \quad (3)$$

Для перехода от интегрального измеряемого сдвига к локальному радиальному распределению электронной плотности $n_e(r)$ использовалось приближение цилиндрической симметрии плазменного канала. В этом случае задача сводится к решению интегрального уравнения Абеля [7, 14, 15]

$$\delta(y) = \frac{2}{\lambda} \int_y^R \frac{[n(r) - 1]r}{\sqrt{r^2 - y^2}}. \quad (4)$$

Численное решение уравнения (4) в сочетании с алгоритмами сглаживания позволяет перейти от зарегистрированных поперечных профилей фазового сдвига к искомому радиальному распределению электронной плотности $n_e(r)$ в исследуемом канале разряда.

Полученные результаты

Для анализа физических параметров плазменного канала высоковольтного атмосферного разряда были исследованы экспериментальные интерферограммы, полученные на двух длинах волн: $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 1064$ (рис. 1). На основе зарегистрированных интерференционных картин были восстановлены пространственные распределения фазового сдвига. Полученные фазовые карты использовались совместно для определения локальной электронной плотности n_e .

На начальном этапе выполнялось выделение центров интерференционных полос, определяющих форму фазового сдвига. На рисунке 2 представлены зарегистрированные интерферограммы плазменного канала вблизи катода и результаты геометрического выделения центров полос. Поперечный размер исследуемого разрядного канала составляет около 450 мкм. Различие в числе наблюдаемых интерференционных полос для двух длин волн обусловлено двукратной разницей в длине волны зондирующего излучения $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 1064$, а также дисперсионными свойствами плазмы.

Вдоль каждой полосы были экспериментально определены координаты их центров. Выделенные центры полос на рисунке 2 визуализированы поверх зарегистрированных интерференционных картин, что позволяет наглядно оценить точность их локализации. Каждой выделенной полосе соответствует своя группа точек, обозначенная отдельным символом (А, В, С, D). На основе полученных геометрических координат центров полос выполнена реконструкция радиального профиля электронной плотности с использованием обратного преобразования Абеля (4).

Поскольку обратное преобразование Абеля является некорректной задачей и усиливает высокочастотные шумовые компоненты, полученные радиальные профили электронной плотности подвергались регуляризации. Для этого использовалась аппроксимация взвешенными В-сплайнами

$$\min_{S_B(r)} \left[\sum_i \frac{(e_i(r_i) - S_B(r_i))^2}{\sigma_i^2} + S_p \int (S_B''(r))^2 dr \right], \quad (5)$$

где e_i – значения электронной плотности, полученные после обратного преобразования Абеля, σ_i – оценки погрешностей, S_B – сглаживающий В-сплайн, S_p – параметр регуляризации. Первый член обеспечивает согласование с экспериментальными данными, а второй ограничивает кривизну решения и подавляет осцилляции, возникающие вследствие абелизации. Параметр сглаживания S_p подбирается таким образом, чтобы сохранить физическую форму профиля при эффективном подавлении шума [16, 17].

На рисунке 3 представлены восстановленные и сглаженные радиальные профили плазменных каналов, которые были показаны на рисунке 2.

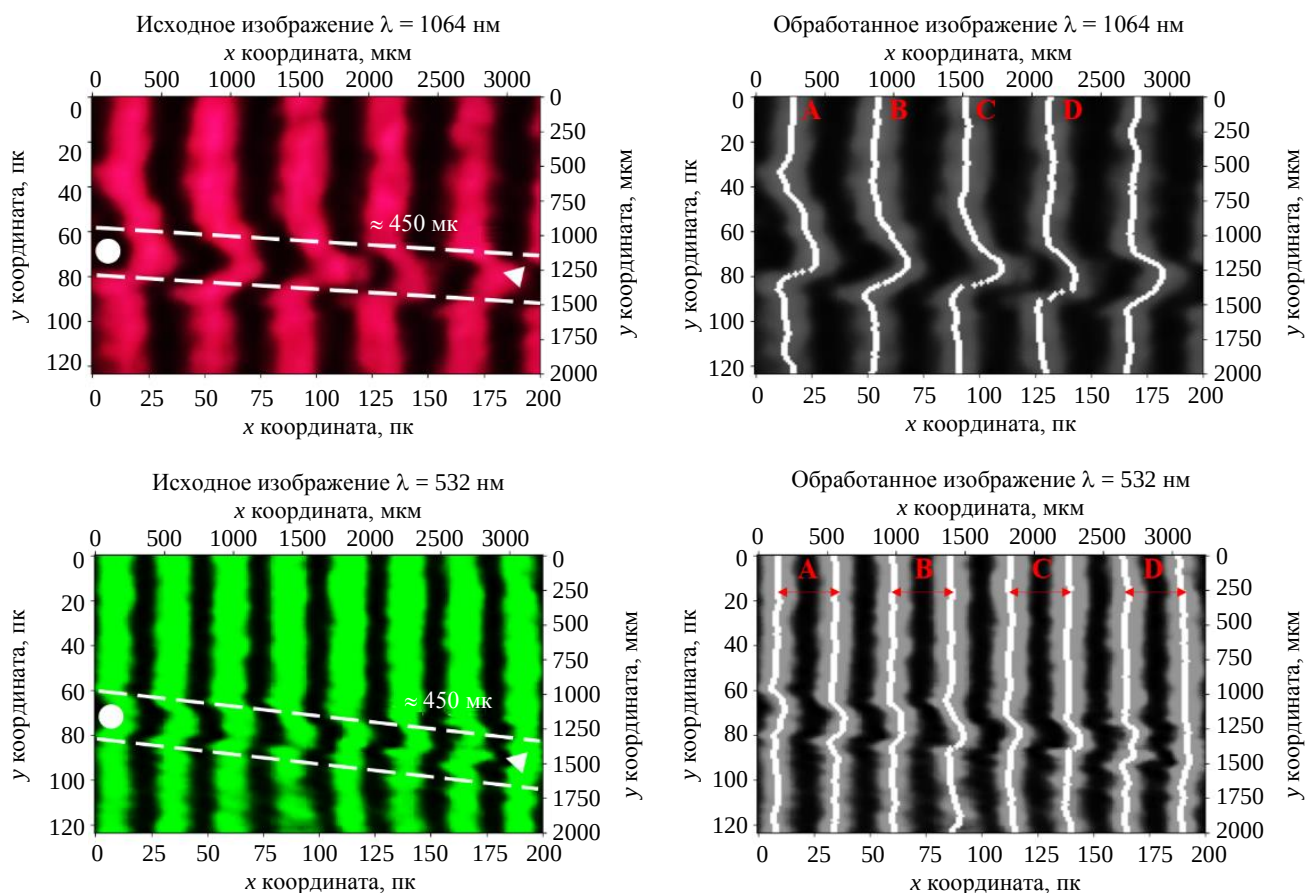


Рис. 2. Интерферограммы и результаты их обработки. Направление катода представлено треугольником, а анода – кругом. Точки, обозначенные символами А, В, С и D, соответствующими определённым полосам и их положению на интерференционной картине

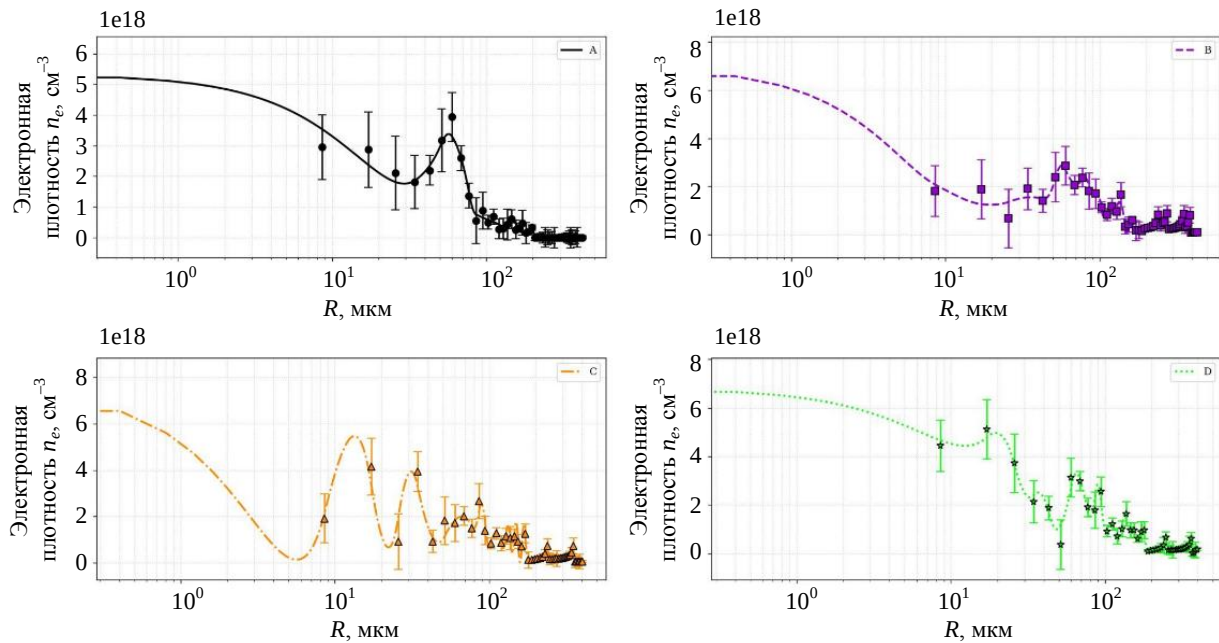


Рис. 3. Радиальные профили электронной плотности $n_e(r)$, восстановленные с помощью обратного преобразования Абеля, отмеченные точками, и их сглаженная аппроксимация взвешенными B-сплайнами показана линиями

Использование сглаживающих B-сплайнов позволило эффективно подавить экспериментальные шумы и восстановить непрерывное пространственное распределение электронной плотности n_e . Максимальное значение электронной плотности достигается в приосевой области $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3} - 8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Наличие характерных локальных скачков плотности на профилях указывает на неоднородную структуру лидерного канала. Оценки погрешностей σ_i вычислялись на основе экспериментальных данных и определялись совокупным вкладом локализации центров интерференционных полос, а также локальной асимметрией поперечного сечения плазменного канала относительно оси абелизации.

На основе восстановленных радиальных профилей электронной плотности $n_e(r)$ (рис. 3) реконструировано двумерное распределение $n_e(x, y)$, характеризующее пространственную структуру плазменного канала (рис. 4). Для построения непрерывной карты по дискретному набору вычисленных значений применялась радиально-базисная интерполяция (Radial Basis Function, RBF) [18, 19]. В рамках данного подхода искомая функция распределения представляется в виде взвешенной суммы радиально-симметричных базисных функций

$$n_e(x, y) = \sum_{i=1}^N o_i \phi((x, y) - (x_i, y_i)), \quad (6)$$

где o_i – весовые коэффициенты, определяемые из системы линейных уравнений, x_i, y_i – координаты исходных точек, а $\phi(r)$ – выбранная радиально-базисная функция. В данном подходе использовалась сглаживающая функция вида

$$\phi(r) = \sqrt{r^2 + \epsilon^2}, \quad (7)$$

где r – евклидово расстояние между интерполируемой точкой и узлами выборки, а параметр ϵ задаёт степень сглаживания интерполяции. Полученная двумерная карта электронной плотности $n_e(x, y)$ (рис. 4) позволила визуализировать пространственную структуру плазмы и выявить выраженную пространственную неоднородность плазменного канала. Полученное распределение показывает, что канал разряда характеризуется наличием дискретных областей с повышенной концентрацией электронов. В целом обнаруживается существенная неравномерность параметров плазмы как в поперечном сечении токового шнура, так и вдоль направления его распространения.

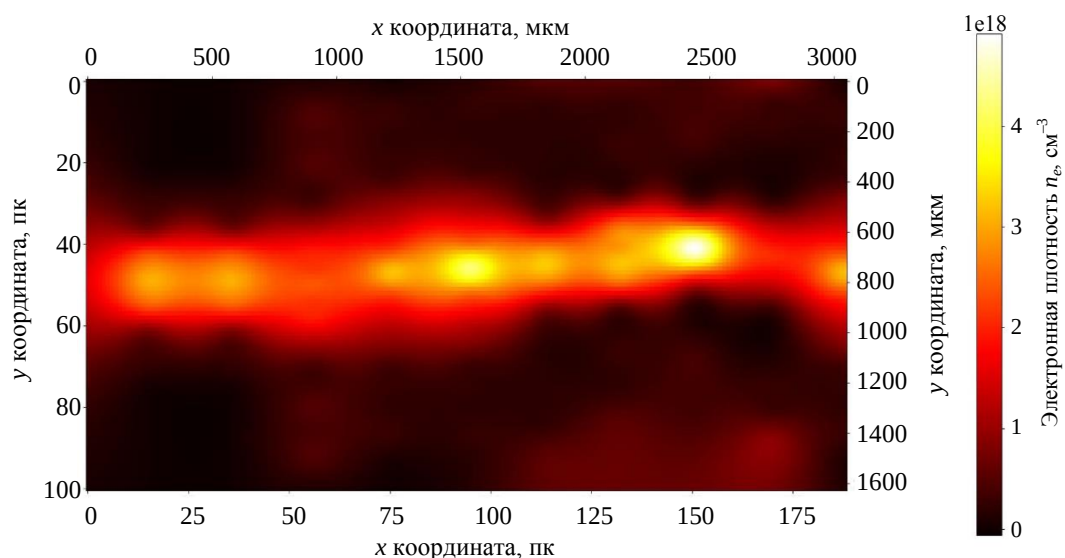


Рис. 4. Восстановленная двумерная карта распределения электронной плотности $n_e(x, y)$ в области плазменного канала, полученная методом радиально-базисной интерполяции

Заключение

В работе представлена комплексная методика анализа интерференционных изображений, получаемых при диагностике быстропротекающих атмосферных газовых разрядов в экспериментальных условиях. Разработанный подход обеспечивает надежное автоматическое детектирование координат центров интерференционных полос, их геометрическую группировку и последующую реконструкцию локальных параметров плазмы.

Предложенный метод основан на совместном использовании обратного преобразования Абеля, сглаживающей В-сплайнов и радиально-базисной интерполяции. Сформулированная расчетная схема позволяет восстанавливать радиальные профили электронной плотности, а также реконструировать двумерные карты пространственного распределения $n_e(x, y)$, детально отражающие структуру и градиенты параметров плазменного канала.

Разработанная методика существенно повышает точность и воспроизводимость результатов оптической диагностики нестационарной плазмы. Предложенный подход может быть эффективно применен для исследования физических процессов на стримерной и лидерной стадиях атмосферного газового разряда, а также адаптирован для широкого класса фундаментальных и прикладных задач диа-

гностики высокотемпературных газодинамических объектов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Смазновой Христине Тимофеевне за ценный вклад в подготовку экспериментальной диагностики, представленной в данной статье.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств Российского научного фонда (грант № 23-19-00524-П).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petersen D., Bailey M., Beasley W. H., Hallett J. / J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. № 17. P. D17205. <https://doi.org/10.1029/2007JD009036>
2. Rahman M., Cooray V., Ahmad N. A., Nyberg J., Rakov V. A., Sharma S. / Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. № 6. P. L06805; <https://doi.org/10.1029/2007GL032678>
3. Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. Lightning Physics and Lightning Protection. – Bristol: Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000.
4. Mesyats G. A. Pulsed Power and Electronics. – Moscow: Nauka, 2004.
5. Kochkin P. O., van Deursen A. P. J., Ebert U. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. № 2. P. 025205. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/2/025205>
6. Dwyer J. R., Saleh Z., Rassoul H. K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M. A., Rakov V. A. / J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. № 23. P. D23207. <https://doi.org/10.1029/2008JD010315>

7. Зайдель А. Н., Островская Г. В. Лазерные методы исследования плазмы. – Л.: Наука, 1977.
8. Romanova V. M., Ivanenkov G. V., Parkevich E. V., Tilikin I. N., Medvedev M. A., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A., Selyukov A. S. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. Vol. 54. № 17. P. 175201. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abdce5>
9. Smaznova Ch. T., Medvedev M. A., Gavrilov S. Yu., Oginov A. V. / Kvant. Elektron. 2024. Vol. 54. № 11. P. 673–677.
10. Smaznova Kh. T., Batrakov P. K., Rodionov A. A., Oginov A. V. / Phys. Rev. E 2026. Vol. 113. № 3. P. 035211. <https://doi.org/10.1103/g9b8-f4jf>
11. Baidin I. S., Batrakov P. K., Bolotov Ya. K., Gasratov F. K., Parkevich E. V., Rodionov A. A., Starovoi-tova P. A., Shpakov K. V., Oginov A. V. / Teplofiz. Vys. Temp. 2026. Vol. 64. № 1. P. 28–41. <https://doi.org/10.7868/S3034610X26010035>
12. Batrakov P. K., Baidin I. S., Rodionov A. A., Oginov A. V. / Tech. Phys. Lett. 2026. Vol. 52. № 3. P. 21–25. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2026.03.62177.20469>
13. Komuro A., Natsume C., Ando A. / Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. № 9. P. 095007. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac1def>
14. Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion / eds. R. W. Ladenburg, B. Lewis, R. N. Pease, H. S. Taylor. – London: Oxford University Press, 1955.
15. Gribkov V. A., Nikulin V. Ya., Sklizkov G. V. / Sov. J. Quantum Electron. 1971. Vol. 1. № 6. P. 60–68. <https://doi.org/10.1070/QE1972v001n06ABEH003297>
16. Lalgudi Gopalakrishnan G., Schmidt M. / Earth Planets Space. 2022. Vol. 74. P. 143. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01693-4>
17. Glasser J., Chapelle J., Boettner J. C. / Appl. Opt. 1978. Vol. 17. № 23. P. 3750–3754. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003750>
18. Majdisova Z., Skala V. / Comput. Geosci. 2017. Vol. 109. P. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.08.007>
19. Arora G., KiranBala, Emadifar H., Khademi M. / J. Egypt. Math. Soc. 2023. Vol. 31. P. 6. <https://doi.org/10.1186/s42787-023-00164-3>

PACS: 52.70.-m

A Method for Analyzing Interferograms in Two-Wavelength Interferometry of Leader Channels in Atmospheric Discharges

P. K. Batrakov^{1*}, I. S. Baidin¹, A. A. Rodionov¹, Ya. K. Bolotov¹, F. K. Gasratov¹, P. A. Starovoi-tova^{1,2}, M. A. Medvedev¹, Yu. K. Kurilenkov³, and A. V. Oginov¹

¹ P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: p.batrakov@lebedev.ru

² HSE University, Moscow, 109028 Russia

³ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

Received 17.07.2026; revised 28.07.2026; accepted 22.10.2026

The paper presents a methodology for studying the spatial structure of leader channels of atmospheric gas discharges. Based on digital processing of interferograms, including automatic detection of fringe centers, inverse Abel transformation, and radial basis interpolation, two-dimensional maps of the spatial distribution of electron density $n_e(x, y)$ were reconstructed in detail. Characteristic features of the radial structure and density gradients in the discharge channels were identified, confirming the high stability of the proposed comprehensive approach to the diagnostics of non-stationary plasma. The set of the presented results confirms that the developed methodology is applicable to laboratory atmospheric discharges.

Keywords: two-wavelength interferometry, atmospheric electrical discharge.

REFERENCES

1. Petersen D., Bailey M., Beasley W. H., and Hallett J., J. Geophys. Res. **113** (17), D17205 (2008).
2. Rahman M., Cooray V., Ahmad N. A., Nyberg J., Rakov V. A., and Sharma S., Geophys. Res. Lett. **35** (6), L06805 (2008).

3. Bazelyan E. M. and Raizer Yu. P. *Lightning Physics and Lightning Protection*. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000.
4. Mesyats G. A. *Pulsed Power and Electronics*. Moscow: Nauka, 2004 [in Russian].
5. Kochkin P. O., van Deursen A. P. J., and Ebert U., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2), 025205 (2015).
6. Dwyer J. R., Saleh Z., Rassoul H. K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M. A., and Rakov V. A., *J. Geophys. Res.* **113** (23), D23207 (2008).
7. Zaidel A. N. and Ostrovskaya G. V. *Laser Methods for Plasma Investigation*. Leningrad: Nauka, 1977 [in Russian].
8. Romanova V. M., Ivanenkov G. V., Parkevich E. V., Tilikin I. N., Medvedev M. A., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A., and Selyukov A. S., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** (17), 175201 (2021).
9. Smaznova Ch. T., Medvedev M. A., Gavrilov S. Yu., and Oginov A. V., *Kvant. Elektron.* **54** (11), 673–677 (2024) [in Russian].
10. Smaznova Kh. T., Batrakov P. K., Rodionov A. A., and Oginov A. V., *Phys. Rev. E* **113** (3), 035211 (2026).
11. Baidin I. S., Batrakov P. K., Bolotov Ya. K., Gasratov F. K., Parkevich E. V., Rodionov A. A., Starovoi-tova P. A., Shpakov K. V., and Oginov A. V., *Teplofiz. Vys. Temp.* **64** (1), 28–41 (2026) [in Russian].
12. Batrakov P. K., Baidin I. S., Rodionov A. A., and Oginov A. V., *Tech. Phys. Lett.* **52** (3), 21–25 (2026).
13. Komuro A., Natsume C., and Ando A., *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** (9), 095007 (2021).
14. *Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion*, eds. Ladenburg R. W., Lewis B., Pease R. N., and Taylor H. S. London: Oxford University Press, 1955.
15. Gribkov V. A., Nikulin V. Ya., and Sklizkov G. V., *Sov. J. Quantum Electron.* **1** (6), 60–68 (1971).
16. Lalgudi Gopalakrishnan G. and Schmidt M., *Earth Planets Space* **74**, 143 (2022).
17. Glasser J., Chapelle J., and Boettner J. C., *Appl. Opt.* **17** (23), 3750–3754 (1978).
18. Majdisova Z. and Skala V., *Comput. Geosci.* **109**, 51–58 (2017).
19. Arora G., KiranBala, Emadifar H., and Khademi M., *J. Egypt. Math. Soc.* **31**, 6 (2023).

Об авторах

Батраков Павел Кириллович, высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: p.batrakov@lebedev.ru SPIN-код: 6265-4824, AuthorID: 1330126, ORCID ID: 0009-0003-5159-3256, Scopus Author ID: 59451053500

Байдин Иван Сергеевич, к.ф.-м.н., высококвалифицированный научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: i.baydin@lebedev.ru SPIN-код: 4215-4937, AuthorID: 1321989, ORCID ID: 0009-0008-7188-4647, Scopus Author ID: 57410222600

Родионов Андрей Александрович, к.ф.-м.н., высококвалифицированный научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: rodionovaa@lebedev.ru SPIN-код: 4998-5386, AuthorID: 739643, ORCID ID: 0000-0002-6267-2465

Болотов Ярослав Константинович, высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: ya.bolotov@lebedev.ru ORCID ID: 0000-0001-5179-0223

Гасратов Фарид Кудратович, высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: f.gasratov@lebedev.ru SPIN-код: 6316-3693, AuthorID: 1323014, ORCID ID: 0009-0002-9389-9547, Scopus Author ID: 57223850684

Старовойтова Полина Александровна, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия); Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (109028, Москва, Россия). E-mail: p.starovoitova@lebedev.ru SPIN-код: 1464-7992, AuthorID: 1332346, ORCID ID: 0009-0006-5180-6495

Медведев Михаил Андреевич, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: 0067NW@rambler.ru ORCID ID: 0000-0002-9996-5130, Scopus Author ID: 57193313800

Куриленков Юрий Константинович, к.ф.-м.н., высококвалифицированный старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Москва, Россия). E-mail: yu.kurilenkov@lebedev.ru SPIN-код: 8645-8675, Author ID: 27108, ORCID ID: 0000-0001-8305-9574, Scopus Author ID: 6603877505

Огинов Александр Владимирович, к.ф.-м.н., высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) (119991, Москва, Россия). E-mail: oginovav@lebedev.ru SPIN-код: 5658-4468, Author ID: 137426, ORCID ID: 0000-0003-4151-6903