

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-832-838

УДК 53.082.54

## Применение метода цифровой голографической интерферометрии для исследования низкотемпературной импульсной плазмы

Анастасия Михайловна Кожевникова<sup>1</sup>✉, Антон Сергеевич Иванков<sup>2</sup>,  
Дмитрий Владимирович Шитц<sup>3</sup>, Игорь Вячеславович Алексеенко<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация

<sup>1</sup> AKozhevnikova1@kantiana.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>

<sup>2</sup> AIvankov@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1689-1974>

<sup>3</sup> DSCHitz@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0477-8456>

<sup>4</sup> IAlekseenko@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлен метод цифровой голографической интерферометрии для регистрации и оценки параметров низкотемпературной плазмы, генерируемой при атмосферном давлении в импульсном режиме. Подобный вид плазмы в настоящее время находит свое применение в медицине и биологии. Существует потребность контроля дозы воздействия и режимов формирования плазменной среды. В качестве контролируемых параметров плазмы рассмотрена концентрация электронов, которая может быть определена путем оценки изменения показателя преломления плазмы в импульсе относительно невозмущенного состояния. **Метод.** Рабочей средой формирования импульсов плазмы служил гелий. Частота следования импульсов плазмы составляла 5 кГц, а их длительность — 750 нс. Исследования выполнены на специально разработанном лабораторном комплексе регистрации голографических изображений импульсов плазмы. Голограммы зарегистрированы с использованием цифровой камеры. В качестве источника когерентного излучения выбран импульсный лазер INNOLAS SpitLight Hybrid II с длиной волны 532 нм и длительностью импульса излучения 10 нс. Для точной регистрации импульсов плазмы работа лазера, генератора плазмы и цифровой камеры были синхронизированы между собой. В ходе эксперимента получена серия из 500 голограмм с последующей реконструкцией фазы объектного поля. Анализ последовательности голограмм позволил определить разности фаз, связанных с показателем преломления низкотемпературной импульсной плазмы в гелии. Однако такая плазма создает малую фазовую задержку, что приводит к низкому фазовому контрасту рассчитываемых интерферограмм. С другой стороны, низкий контраст может быть вызван и недостатками системы регистрации. Для доказательства возможности системы записи голограмм проведены предварительные эксперименты с регистрацией плазменной дуги с аналогичными временными параметрами генерации, но с более высоким фазовым контрастом реконструированных изображений. **Основные результаты.** Представлены экспериментальные результаты исследования фазового контраста показателя преломления чистого гелия, плазменной дуги и импульсов плазмы в гелии. Доказана работоспособность разработанного экспериментального комплекса и метода получения интерферограмм, основанного на определении показателя преломления в импульсе плазмы. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для оценки электронной концентрации плазмы. В дальнейшем планируется увеличение чувствительности метода с целью повышения фазового контраста за счет расширения спектрального диапазона лазерного излучения при регистрации голограмм путем перехода в другую спектральную область, например, инфракрасную.

### Ключевые слова

цифровая голографическая интерферометрия, голографическая интерферометрия, нетермальная плазма, концентрация электронов в плазме, автоматизация эксперимента

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки Российской Федерации № FZWM-2020-0003 «Исследование новых материалов и методов плазмо- и фототерапии онкологических заболеваний, дерматитов и септических осложнений» 2020–2023 гг.

© Кожевникова А.М., Иванков А.С., Шитц Д.В., Алексеенко И.В., 2022

**Ссылка для цитирования:** Кожевникова А.М., Иванков А.С., Шитц Д.В., Алексеенко И.В. Применение метода цифровой голографической интерферометрии для исследования низкотемпературной импульсной плазмы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 832–838. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-832-838

## Implementation of digital holographic interferometry for pulsed plasma studies

Anastasiia M. Kozhevnikova<sup>1</sup>, Anton S. Ivankov<sup>2</sup>, Dmitry V. Schitz<sup>3</sup>, Igor V. Alekseenko<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation

<sup>1</sup> AKozhevnikova1@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>

<sup>2</sup> AIvankov@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1689-1974>

<sup>3</sup> DSchitz@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0477-8456>

<sup>4</sup> IAlekseenko@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>

### Abstract

The study of low-temperature plasma generated in pulsed mode at atmospheric pressure was carried out. The purpose of the presented research is to develop a method of digital holographic interferometry for registration and evaluation of parameters of low-temperature plasma at atmospheric pressure in pulsed mode. This type of plasma is currently applied in medicine and biology. Thus, there is a need to control the exposure dose and plasma environment formation regimes. As plasma parameters, it can be considered its electron concentration which can be calculated through the estimation of the refractive index of plasma pulse in relation to unperturbed state. The plasma pulses were activated in Helium. The plasma pulse frequency was 5 kHz and its duration was 750 ns. During an investigation a laboratory set-up for recording holographic images of plasma pulses was developed. Holograms are acquired on a digital camera and a pulsed laser INNOLAS SpitLight Hybrid II at a wavelength of 532 nm with pulse duration of 10 ns is used as a source of coherent radiation. In order to record plasma pulses, the laser, plasma generator and digital camera were strictly synchronized to each other. During the experiment, a series of about 500 holograms were acquired, and the reconstruction of the phase of the object field was calculated. Analysis of the sequence of holograms allowed calculations of phase difference (interferograms) related to the refractive index of low-temperature pulsed plasma in Helium. It is known that low-temperature plasma leads to low phase delay which forms low phase contrast of the evaluated interferograms. For this purpose, we carried out preliminary experiments with plasma-arc that has similar temporary parameters, however, with a higher phase contrast of the interferograms. The paper presents experimental results obtained by studying the phase contrast of the refractive index of pure Helium, plasma-arc and plasma pulses in Helium. Thus, the effectiveness of both the experimental set-up and the method to evaluate the interferograms related to the refractive index of the plasma pulse was verified. The data obtained can then be used to estimate the electron concentration of the plasma. However, it needs to increase the sensitivity of the method in order to enhance phase contrast. Increase of sensitivity can be done by means of extension of the spectral range, for example, toward to infra-red.

### Keywords

digital holographic interferometry, holographic interferometry, nonthermal plasma, plasma electron concentration, experiment automation

### Acknowledgements

This study was performed in accordance with the Government Assignment supported by the RF Ministry of education and science, Project No. FZWM-2020-0003 “Investigation of advanced materials and methods for plasma and phototherapy of oncological and skin diseases and septic complications” for the years 2020–2023.

**For citation:** Kozhevnikova A.M., Ivankov A.S., Schitz D.V., Alekseenko I.V. Implementation of digital holographic interferometry for pulsed plasma studies. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 832–838 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-832-838

### Введение

Низкотемпературная плазма успешно используется для лечения кожных заболеваний [1]. Это связано с тем, что поток такой плазмы содержит заряженные частицы (электроны и ионы), образует радикалы озона, азота и кислорода и создает ультрафиолетовое излучение (в диапазоне 20–300 нм), что позволяет разрушать мембраны патогенных микроорганизмов [2]. Для терапии кожных покровов низкотемпературная плазма применяется в импульсно-периодическом режиме, и существует проблема дозы ее воздействия, которая определяется величиной концентрации электронов. Известно, что для определения электронной концентрации используют зондовые методы, однако для импульсной плазмы использовать такие методы достаточно трудно, а ре-

ализация спектральных методов требует дорогостоящего оборудования [3]. С другой стороны, возможно применение более доступных и простых методов, таких как цифровая голографическая интерферометрия [4–6].

В видимом спектральном диапазоне регистрации голографические методы позволяют определять концентрацию электронов от  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Однако возможно увеличение чувствительности таких методов [7, 8], в том числе и за счет расширения динамического диапазона цифровых детекторов, используемых для записи голограмм.

Следует отметить, что исследование нетермальной медицинской плазмы методами цифровой голографической интерферометрии связано с рядом особенностей, которые необходимо учитывать в работе. Во-первых, поток плазмы представляет собой импульс с частот-

той от 5 кГц, а время генерации одной плазменной струи — 750 нс. Таким образом, все приборы должны быть точно синхронизированы с учетом времени срабатывания каждого из них. Во-вторых, генерация плазмы происходит в газовом потоке, который имеет большую плотность, а возникающие в момент ее генерации тепловые процессы искажают требуемую информацию о плазме и должны быть скомпенсированы.

### Используемые методы и подходы

В голографической интерферометрии поток плазмы рассматривается как фазовый (прозрачный) объект, а результирующие интерференционные полосы формируются относительно начальной газовой среды в результате изменения показателя преломления, вносимого плазмой [4]. Также полученные значения показателя преломления плазмы позволяют рассчитать ее электронную концентрацию [9].

Связь разности фаз с показателем преломления описывается соотношением:

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{l_1}^{l_2} [n(x, y, z) - n_0] dz,$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера;  $n_0$  — показатель преломления наблюдаемой среды в ее начальном состоянии;  $n(x, y, z)$  — конечное распределение показателя преломления. Излучение проходит через среду в направлении  $z$ , и интегрирование производится вдоль этого направления.

При анализе показателя преломления плазмы исходят из известного соотношения для расчета ее рефракции [7, 8]

$$n - 1 = \sum_{i=1}^k \left( A_i + \frac{B_i}{\lambda^2} \right) N_{a_i} - 4,5 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e,$$

где  $N_e$  и  $N_{a_i}$  — электронная и атомная концентрации;  $A$  и  $B$  — константы Коши. В работе [8] отмечено, что в спектральном диапазоне, далеком от линий поглощения атомов, показатель преломления атомов слабо зависит от длины волны. В связи с этим используем длину волны 532 нм, и в первом приближении не будем учитывать влияние концентрации атомов на показатель преломления. Таким образом, получим следующее приближение для разности фаз [8]:

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} l \Delta n,$$

$$\Delta n = 4,5 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e,$$

где  $l$  — длина пути света в исследуемой среде;  $\Delta n$  — разность показателей преломления.

В [7] показано, что для определения концентрации электронов можно воспользоваться соотношением:

$$N_e = 2,2 \cdot 10^{13} \frac{\Delta\varphi}{2\pi l \lambda}.$$

В настоящей работе формирование плазменной струи осуществлено на выходе стеклянной трубки в гелии под давлением 1,01 атм. Диаметр трубки равен

5 мм. Таким образом, для дальнейших оценок можно исходить из условия, что вблизи трубки газовая струя и плазма имеют приблизительно одинаковые пространственные размеры и цилиндрический профиль, а длина оптического пути излучения поперек газовой струи также составляет 5 мм.

Опишем метод стробоскопической голографической интерферометрии [10], позволяющий проводить наблюдение и анализ плазмы, генерируемой с частотой 5 кГц и длительностью 750 нс. Для регистрации импульсов плазмы разработана система синхронизации и управления устройствами комплекса с использованием программно-аппаратных средств National Instruments. Регистрация изображений осуществлена по схеме записи голограмм сфокусированного изображения. В качестве источника когерентного излучения использован Nd:YAG лазер компании INNOLAS с длиной волны 532 нм, длительностью импульса 10 нс и частотой следования импульсов 50 Гц. Расчет разности фаз между двумя состояниями объекта выполнен методом фурье-анализа [11]. На рис. 1 представлена схема исследовательского комплекса.

При создании схемы регистрации быстропротекающих процессов, особое место занимает разработка системы синхронизации всех оптоэлектронных устройств между собой (цифровой камеры, лазера, блока генерации плазмы) для обеспечения автоматизации эксперимента. При этом необходимо учесть, что каждое электронное устройство комплекса обладает собственным временем отклика и рабочей частотой. Управление устройствами и их синхронизация организована через программно-аппаратную среду LabView, формирующую триггер-сигналы с заданными начальными задержками. Таким образом, по синхронизирующим триггер-сигналам на камеру, импульсный лазер и на плату управления генерацией плазмы осуществлена согласованная работа всех электронных устройств. В проведенном эксперименте частота следования импульсов плазмы составила 5 кГц для плазмы, а частота следования импульсов лазера и частота регистрации камеры — 50 Гц. Следовательно, зарегистрирован каждый сотый импульс плазмы. Для длительности плазменного импульса 750 нс и импульса лазера в 10 нс время экспозиции камеры не имело принципиального значения, так как регистрация информации на матрицу камеры происходит за время генерации лазерного импульса.

### Основные результаты и обсуждение

В работе представлены результаты регистрации плазмы двух видов: плазменной дуги и струи, которые сгенерированы в импульсном режиме. Отметим, что сначала необходимо выполнить верификацию метода и разработанной техники на предмет получения достоверных данных о показателе преломления по реконструированным фазовым распределениям. Проверка метода включала следующие процедуры. Проведение регистрации и реконструкции фазы проходящей световой волны через камеру наблюдения, содержащую воздух ( $\varphi_0$ ), а затем и при включенном потоке гелия ( $\varphi_{0+he}$ ).

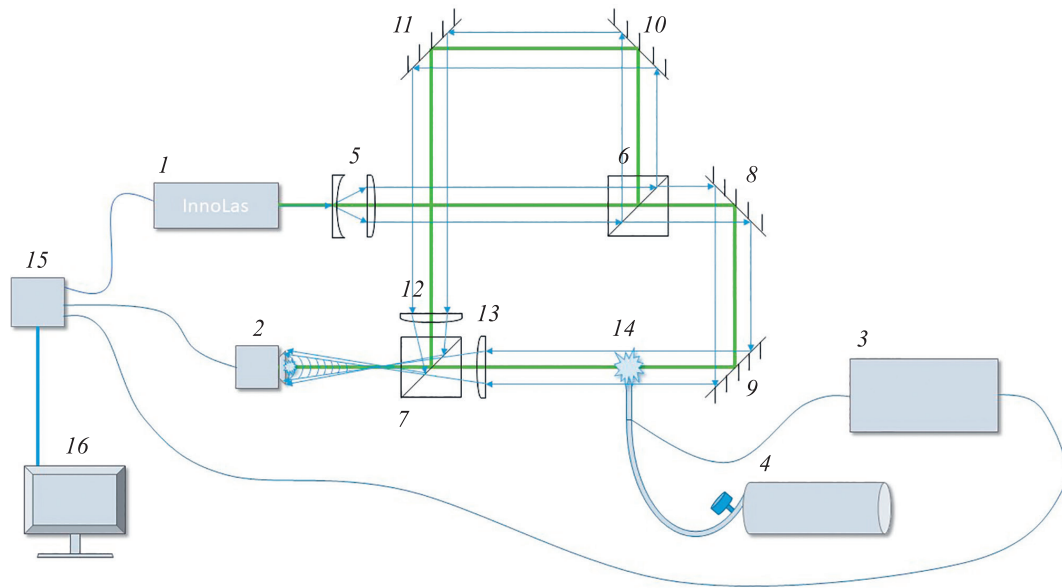


Рис. 1. Комплекс цифровой голографической интерферометрии для исследования потока плазмы в импульсном режиме генерации: 1 — импульсный лазер; 2 — ПЗС-камера; 3 — генератор плазмы; 4 — баллон с газом; 5 — коллиматор; 6, 7 — светоделители; 8–11 — зеркала; 12, 13 — собирающие линзы; 14 — струя холодной плазмы; 15 — система синхронизации; 16 — компьютер

Fig. 1. Digital holographic interferometry set-up to investigate a plasma flow in the pulsed generation mode. 1 — pulse laser; 2 — CCD-camera; 3 — pulse-plasma generator; 4 — helium container; 5 — collimator; 6, 7 — beamsplitter; 8–11 — mirrors; 12, 13 — lenses; 14 — plasma jet; 15 — synchronization unit; 16 — PC

где  $\varphi_{he}$  — фазовые изменения, связанные с наличием потока гелия. Полученная разность фаз ( $\varphi_{0+he} - \varphi_0$ ) содержала информацию о разности показателей преломления двух газов. Зная их табличные значения, выполнена оценка достоверности определения показателя преломления с помощью предложенной системы регистрации. На рис. 2 показана развертка разности фаз при прохождении зондирующего излучения через поток гелия. В результате получено, что для воздуха показатель преломления  $n_a = 1,000292$ , для гелия —  $n_{he} = 1,0000350$ . Разность показателей преломления составляет  $2,57 \cdot 10^{-4}$ , а разность фаз — 15,17 рад или 2,4 интерференционных полосы для длины волны 532 нм и толщины среды 5 мм.

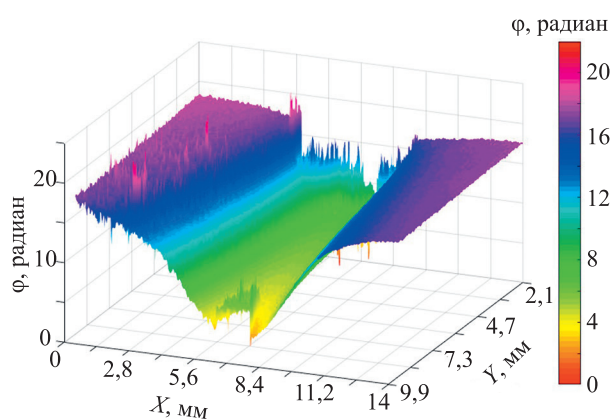


Рис. 2. Фазовая развертка интерферограммы струи гелия  
Fig. 2. Phase unwrapping distribution of the helium jet

Заметим, что относительная разность фаз для нижних точек поверхности фаз и точек за пределами трубки лежит в пределах 15 рад, что соответствует оценкам. Таким образом, можно сделать вывод, что измерительный комплекс регистрации голограмм фазовых объектов и метод их оценки, позволяют получить достоверные и надежные результаты. Далее выполним экспериментальную работу по регистрации импульсов плазмы (рис. 3), а также анализ полученных интерферограмм, связанных с изменением ее показателя преломления.

Низкотемпературная плазма обладает небольшой концентрацией электронов, и ее вклад в фазовое распределение на голограммах невелик. Для верификации

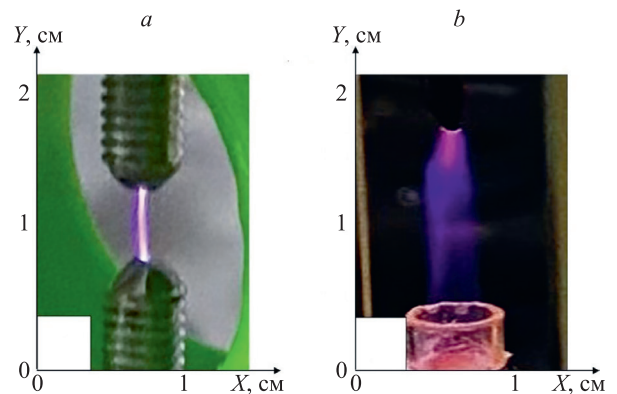


Рис. 3. Изображения плазмы, исследуемой в работе: плазменные дуга (a) и струя в потоке газа гелия (b)  
Fig. 3. Images of plasma: plasma arc (a), plasma jet in the helium flow (b)

метода в аспекте возможности регистрации фазового набега, связанного с существованием плазмы, проведем эксперимент с регистрацией плазменной дуги, которая обладает большей плотностью и может существовать без подачи газа. Отсутствие рабочего газа позволило сократить количество источников возмущений, которые затрудняют регистрацию фазовых изменений, связанных исключительно с наличием плазмы в зоне наблюдения. При проведении эксперимента по регистрации плазменной дуги замечено, что в области существования плазмы возникают температурные возмущения, связанные с увеличением температуры среды (рис. 4, *a*). Для вычисления изменения показателя преломления плазмы выполним дополнительный эксперимент, в котором комплекс работает в асинхронизированном режиме. Это было необходимо, чтобы произвести вычисление разности фаз голограмм с температурной наводкой без плазмы и с плазмой. При сравнении полученных голограмм видно, где распределение разности фаз отображает изменение показателя преломления, связанного исключительно с существованием плазмы (рис. 4, *b, c*). Зафиксировано, что при возникновении плазменной дуги, появляются возмущения внешней среды, которые предположительно можно охарактеризовать как «ударную волну» от короткого разряда.

Результаты регистрации плазменной дуги показали возможность использования предложенной методики и комплекса для регистрации плазмы. Выполним регистрацию нетермальной (медицинской) плазмы, которая обладает меньшей плотностью и существует в потоке газа гелия. Эксперимент проведен со следующими техническими параметрами: камера и лазер имеют частоту 50 Гц, частота импульсов плазмы 5 кГц, длительность существования плазмы 750 нс. Отметим, что эксперимент осложнен тем, что поток газа, в котором существует плазма, не может быть стабилизирован и изменяет направление потока в зависимости от внешних условий, так как, в соответствии с исходными

требованиями, исследование плазмы должно было проводиться при нормальных условиях, т. е. при атмосферном давлении.

Эксперимент осуществлен в следующей последовательности: по внешнему триггер-сигналу направлены сигналы на все электронные элементы с параметрами, обеспечивающими синхронизированную работу комплекса; далее начиналась подача газа и произведен «поджиг» плазмы; после появления плазменного факела была запущена регистрация данных на камере. Через несколько секунд прекращалась подача напряжения на плазму, перекрывалась подача газа, после чего заканчивалась регистрация данных. Таким образом, обеспечивалась регистрация плазменной струи, потока газа без плазмы, с параметрами, близкими к параметрам газа во время существования плазмы, а также регистрация среды без объекта, когда подача газа прекращена.

На рис. 5, *a* представлена интерференционная картина зарегистрированного потока газа с плазмой ( $\varphi_{0+he+plasma}$ ) относительно среды без объекта ( $\varphi_0$ ). Заметим, что поток газа дает больший вклад в распределение разности фаз, чем плазма, так как обладает большей плотностью. Для выделения данных о фазовом распределении, связанном с существованием плазмы, произведем вычисления двух интерферограмм ( $\varphi_{0+he+plasma} - \varphi_{0+he}$ ), где на первой зарегистрирован поток газа с плазмой  $\varphi_{0+he+plasma}$ , а на второй — поток газа после выключения плазмы  $\varphi_{0+he}$ . Результаты вычислений в монохроматическом и цветном представлениях показаны на рис. 5, *b, c*.

На представленных изображениях видно, что конусообразный профиль, связанный с изменением показателя преломления в среде, совпадает с формой профиля плазмы. Можно заключить, что предложенная методика регистрации импульсной плазмы подходит для регистрации таких процессов и, в дальнейшем, должна позволить проводить оценку концентрации электронов в плазме через определение ее показателя преломления.

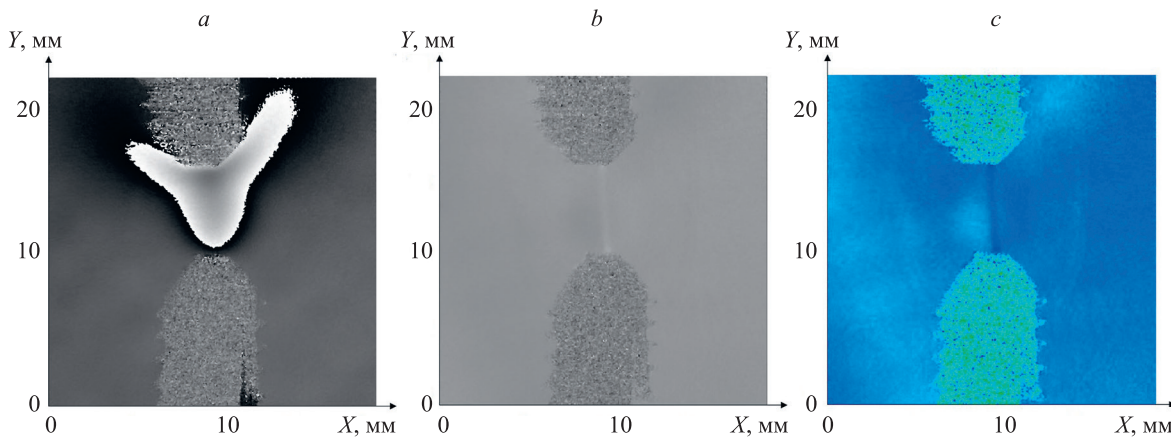


Рис. 4. Интерферограммы фазовых изменений, связанных с наличием плазменной дуги относительно неподвижного воздуха (*a*) и воздуха между импульсами дуги для монохромного (*b*) и цветного (*c*) представлений

Fig. 4. Interferograms of plasma arc in relation to the air (*a*), to the air and between the plasma pulses (monochrome image) (*b*), to the air and between the plasma pulses (color image) (*c*)

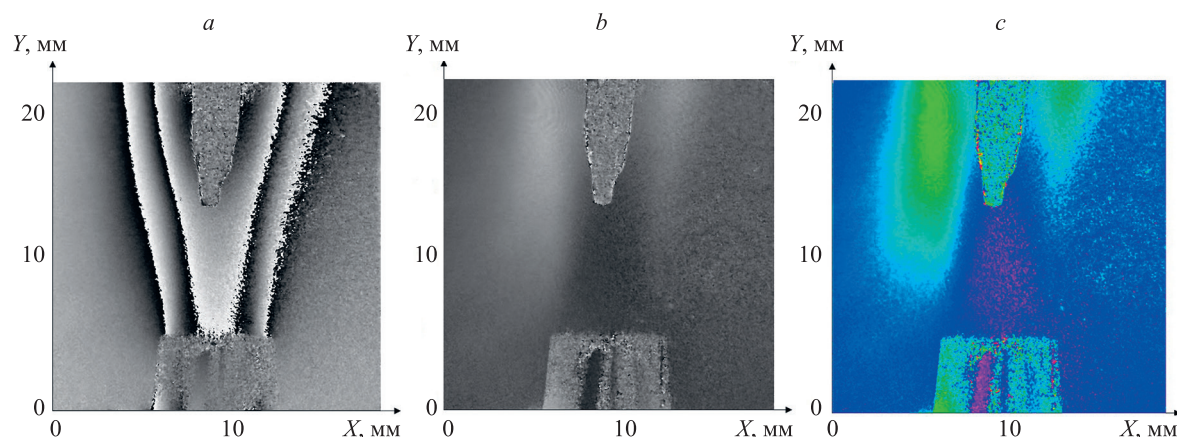


Рис. 5. Интерферограммы фазовых изменений, связанных с наличием плазменной струи в потоке газа относительно неподвижного воздуха (а), и потока гелия между импульсами плазмы при монохромном (b) и цветном (c) представлениях  
 Fig. 5. Phase difference distribution of plasma jet in the gas flow in relation: to the stationary air (a), to the helium flow and between plasma pulses (monochrome image) (b), to the helium flow and between plasma pulses (color image) (c)

### Заключение

Разработана методика регистрации фазовых изменений, связанных с показателем преломления плазмы, которая генерируется в импульсно-периодическом режиме при атмосферном давлении. В результате проведенных экспериментов получены сведения о фазовом контрасте показателя преломления чистого гелия, плазменной дуги и импульсов плазмы, которые генерируются в потоке рабочего газа — гелия. Доказана работоспособность разработанного эксперименталь-

ного комплекса и метода получения интерферограмм, основанного на определении показателя преломления в импульсе плазмы. Полученные результаты могут быть использованы для оценки электронной концентрации плазмы. Стоит отметить необходимость увеличения чувствительности метода с целью повышения фазового контраста за счет расширения спектрального диапазона лазерного излучения при регистрации голограмм путем перехода в другую спектральную область, например инфракрасную.

### Литература

1. Weltmann K.D., Kindel E., von Woedtke T., Hähnel M., Stieber M., Brandenburg R. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine // *Pure and Applied Chemistry*. 2010. V. 82. N 6. P. 1223–1237. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-10-35>
2. Sosnin E.A., Stoffels E., Erofeev M.V., Kieft I.E., Kunts S.E. The effects of UV irradiation and gas plasma treatment on living mammalian cells and bacteria: a comparative approach // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. V. 32. N 4. P. 1544–1550. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.833401>
3. Zhou Q., Cheng C., Meng Y. Electron density and temperature measurement by Stark broadening in a cold argon arc-plasma jet at atmospheric pressure // *Plasma Science and Technology*. 2009. V. 11. N 5. P. 560–563. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/11/5/09>
4. Vest C.M. *Holographic Interferometry*. John Wiley & Sons, 1979. P. 387–396.
5. Schnars U., Juptner W. *Digital Holography*. Springer-Verlag and Heidelberg GmbH & Company K, 2005, 164 p. <https://doi.org/10.1007/b138284>
6. Kreis T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. John Wiley & Sons, 2006. P. 379.
7. Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Y.I. IV Holographic methods of plasma diagnostics // *Progress in Optics*. 1985. V. 22. P. 197–270. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70150-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70150-1)
8. Зайдель А.Н. Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы // *Успехи физических наук*. 1986. Т. 149. № 1. С. 105–138. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0149.198605d.0105>
9. Khanzadeh M., Jamal F., Shariat M. Experimental investigation of gas flow rate and electric field effect on refractive index and electron density distribution of cold atmospheric pressure-plasma by optical method, Moiré deflectometry // *Physics of Plasmas*. 2018. V. 25. N 4. P. 043516. <https://doi.org/10.1063/1.5018054>

### References

1. Weltmann K.D., Kindel E., von Woedtke T., Hähnel M., Stieber M., Brandenburg R. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine. *Pure and Applied Chemistry*, 2010, vol. 82, no. 6, pp. 1223–1237. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-10-35>
2. Sosnin E.A., Stoffels E., Erofeev M.V., Kieft I.E., Kunts S.E. The effects of UV irradiation and gas plasma treatment on living mammalian cells and bacteria: a comparative approach. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, no. 4, pp. 1544–1550. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.833401>
3. Zhou Q., Cheng C., Meng Y. Electron density and temperature measurement by Stark broadening in a cold argon arc-plasma jet at atmospheric pressure. *Plasma Science and Technology*, 2009, vol. 11, no. 5, pp. 560–563. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/11/5/09>
4. Vest C.M. *Holographic Interferometry*. John Wiley & Sons, 1979, pp. 387–396.
5. Schnars U., Juptner W. *Digital Holography*. Springer-Verlag and Heidelberg GmbH & Company K, 2005, 164 p. <https://doi.org/10.1007/b138284>
6. Kreis T. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. John Wiley & Sons, 2006, pp. 379.
7. Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Y.I. IV Holographic methods of plasma diagnostics. *Progress in Optics*, 1985, vol. 22, pp. 197–270. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70150-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70150-1)
8. Zaidel' A.N. Application of holographic interferometry for plasma diagnostics. *Soviet Physics — Uspekhi*, 1986, vol. 29, no. 5, pp. 447–466. <https://doi.org/10.1070/PU1986v029n05ABEH003381>
9. Khanzadeh M., Jamal F., Shariat M. Experimental investigation of gas flow rate and electric field effect on refractive index and electron density distribution of cold atmospheric pressure-plasma by optical method, Moiré deflectometry. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 043516. <https://doi.org/10.1063/1.5018054>

10. Гусев М.Е., Алексеенко И.В. Методы цифровой строболографической интерферометрии в исследованиях механических колебаний // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 11-3. С. 10–17.
11. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // Journal of the Optical Society of America. 1982. V. 72. N 1. P. 156–160. <https://doi.org/10.1364/JOSA.72.000156>
10. Gusev M.E., Alexeenko I.V. Methods of digital stroboholographic interferometry in investigation of mechanical vibrations. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 11-3, pp. 10–17. (in Russian)
11. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, vol. 72, no. 1, pp. 156–160. <https://doi.org/10.1364/JOSA.72.000156>

#### Авторы

**Кожевникова Анастасия Михайловна** — младший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57284792900](https://orcid.org/0000-0002-6642-5226), [AKozhevnikova1@kantiana.ru](mailto:AKozhevnikova1@kantiana.ru)

**Иванков Антон Сергеевич** — младший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57208472768](https://orcid.org/0000-0002-1689-1974), <https://orcid.org/0000-0002-1689-1974>, [AIVankov@kantiana.ru](mailto:AIVankov@kantiana.ru)

**Шитц Дмитрий Владимирович** — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57415437400](https://orcid.org/0000-0002-0477-8456), <https://orcid.org/0000-0002-0477-8456>, [DSCHitz@kantiana.ru](mailto:DSCHitz@kantiana.ru)

**Алексеенко Игорь Вячеславович** — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57207816753](https://orcid.org/0000-0001-8463-3304), <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>, [IAlekseenko@kantiana.ru](mailto:IAlekseenko@kantiana.ru)

Статья поступила в редакцию 07.07.2022  
Одобрена после рецензирования 26.08.2022  
Принята к печати 30.09.2022

#### Authors

**Anastasiia M. Kozhevnikova** — Junior Researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57284792900](https://orcid.org/0000-0002-6642-5226), <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>, [AKozhevnikova1@kantiana.ru](mailto:AKozhevnikova1@kantiana.ru)

**Anton S. Ivankov** — Junior Researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57208472768](https://orcid.org/0000-0002-1689-1974), <https://orcid.org/0000-0002-1689-1974>, [AIVankov@kantiana.ru](mailto:AIVankov@kantiana.ru)

**Dmitry V. Schitz** — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57415437400](https://orcid.org/0000-0002-0477-8456), <https://orcid.org/0000-0002-0477-8456>, [DSCHitz@kantiana.ru](mailto:DSCHitz@kantiana.ru)

**Igor V. Alekseenko** — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57207816753](https://orcid.org/0000-0001-8463-3304), <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>, [IAlekseenko@kantiana.ru](mailto:IAlekseenko@kantiana.ru)

Received 07.07.2022  
Approved after reviewing 26.08.2022  
Accepted 30.09.2022



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»