

# Цифровая голографическая интерферометрия для оценки параметров импульсной плазмы при атмосферных условиях

*А. М. Кожевникова, И. В. Алексеенко, Д. В. Шитц*

Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, Россия

В работе представлен метод наблюдения импульсной плазмы искрового разряда при атмосферных условиях с использованием метода цифровой голографической интерферометрии. Искровой разряд генерировался при атмосферных условиях между двумя электродами с частотой 5 кГц, время подачи напряжения на электроды составляло 1250 нс. Для оценки динамически изменяющихся процессов в плазме, была разработана система сканирования разряда во времени. Показано, что изменение контраста на распределении разности фаз соответствует времени генерации искрового разряда, что также свидетельствует об изменении концентрации электронов в плазме. Проведена оценка концентрации электронов в различные моменты генерации плазмы. Рассмотрены ограничения предложенного метода и обсуждается его применимость для исследования низкотемпературной импульсной плазмы.

*Ключевые слова:* Цифровая голографическая интерферометрия, Холодная плазма, Диагностика плазмы, Концентрация электронов.

*Цитирование:* Кожевникова, А. М. Цифровая голографическая интерферометрия для оценки параметров импульсной плазмы при атмосферных условиях / А. М. Кожевникова, И. В. Алексеенко, Д. В. Шитц // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 281–284.

## Введение

Нетепловая плазма при атмосферном давлении в настоящее время используется в технике или медицине [1-4]. Обычно для воздействия на объект требуются низкие температуры газов, особенно при обработке биологических тканей. Для обеспечения таких условий используются методы импульсного излучения плазмы с частотами 5-15 кГц и длительностью от 10 до 5000 нс. При таких применениях плазмы необходима оценка ее экспозиционной дозы, и ее можно было бы определить по концентрации ее электронов.

Для получения полной информации о характере развития плазменного разряда представляет интерес обеспечение визуализации в области пробоя. Сканирование по времени плазменного разряда может быть осуществлено методами лазерной визуализации прозрачных сред, к которым можно отнести Шлирен-метод и голографические методы. Метод Шлирен-фотографии позволяет детализировать структуру разряда в том числе и в начальные моменты его развития [5]. Визуализация микроканальной структуры разряда позволяет более точно судить о энергетических параметрах плазмы, так как при математических расчетах концентрации электронов в плазме большое значение имеет объем, занимаемый плазмой в пространстве, соответственно в микроканале концентрация электронов может быть значительно выше, чем в интегральном объеме занимаемой плазмой.

## Используемые методы и подходы

Предлагается в качестве основного параметра плазмы рассматривать концентрацию электронов. Известно, что изменение концентрации электронов в плазме меняет ее показатель преломления, а использование методов цифровой голографической интерферометрии позволяет проводить оценку концентрации электронов в плазме через соотношение показателя преломления среды с разностью фаз зарегистрированных электромагнитных волн:

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

где  $\lambda$  – длина волны излучения лазера;  $n_0$  – показатель преломления наблюдаемой среды в ее начальном состоянии;  $n(x, y, z)$  – конечное распределение показателя преломления.

Связь же разности фаз с концентрацией электронов в плазме, как показано в [7], будет иметь вид:

$$N_e=2,2\times 10^{13}\frac{\Delta\phi}{2\pi l\lambda}, \quad (1)$$

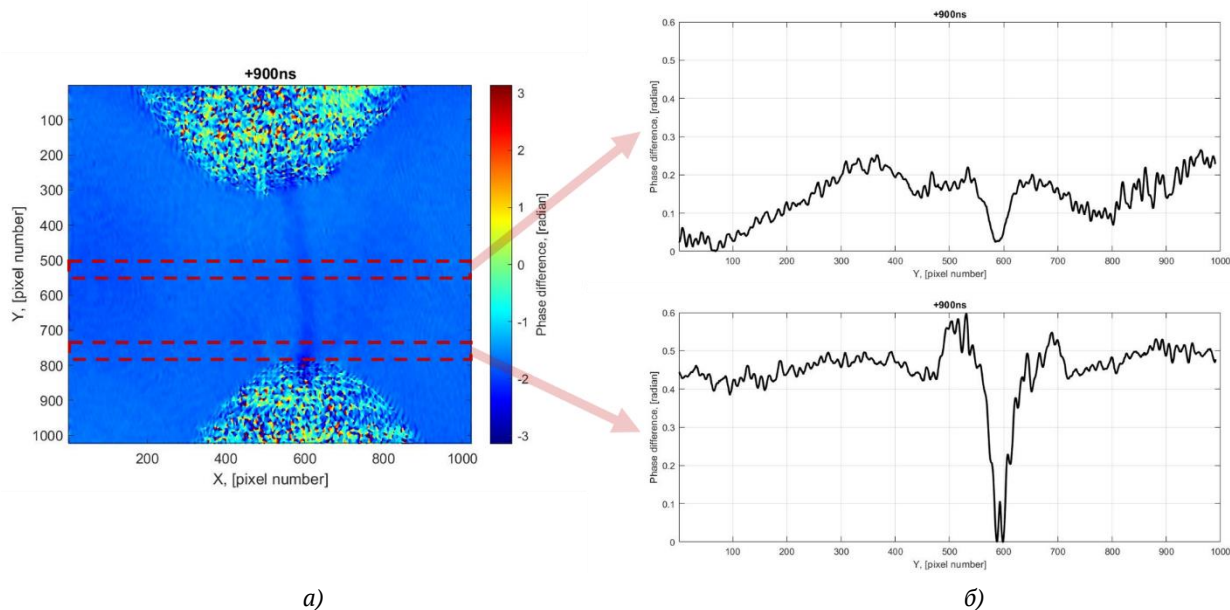
где  $l$  – длина пути света в исследуемой среде.

Плазма искрового разряда была выбрана для отработки методики эксперимента, поскольку ее легко можно получить в нормальных условиях с ожидаемо большей электронной концентрацией, чем в плазменной струе.

Методы голографической интерферометрии хорошо известны и применяются для исследования прозрачных (фазовых) объектов, в том числе плазмы [6-8]. Однако, большинство результатов по исследованию плазмы продемонстрированы методом сравнения полос, который сопоставим с использованием методов аналоговой голографии, в то время как цифровые методы регистрации изображений и современные возможности синхронизации быстропротекающих импульсных процессов могут позволить получить больше информации о такого рода объектах. Основной целью исследования было определение концентрации электронов в плазменном канале в различные моменты времени от начала искрового пробоя до его завершения. Во многом, результативность работы зависит от точности синхронизации процессов, поэтому для этих целей была разработана программно-аппаратная схема автоматизации эксперимента, которая позволила провести сканирование всего разряда по мере его развития.

## Результаты

На рисунке 1 продемонстрированы результаты регистрации искрового разряда методами цифровой голографической интерферометрии, а также представлены значения разности фаз вдоль выделенных на рисунке 1а координат. На графиках видно, что фазовый контраст увеличивается при приближении к электроду, что соответствует увеличению электронной концентрации вблизи электродов [9-10].



**Рис. 1.** Результаты эксперимента по регистрации искрового разряда; (а) интерференционная картина разности фаз со скомпенсированными тепловыми эффектами в поле наблюдения; (б) графическое представление разности фаз в вдоль оси X в значениях  $(x, y) = (0:1020, 500:550)$  и  $(x, y) = (0:1020, 730:780)$ .

В соответствии с графиками на рисунке 1(б) видно, что распределение разности фаз вдоль плазменного канала изменяется и увеличивается вблизи электродов. Используя формулу 1, можно получить значение концентрации электронов  $N_e$ . Таким образом для представленного момента времени развития искрового разряда, концентрация электронов в центральной области будет минимальна и составляет  $n_{e\ min} = 4,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а в приэлектродной области максимальна и составляет  $n_{e\ max} = 8,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

### Заключение

В данной работе представлены метод и голографическая установка для исследования высокочастотного плазменного искрового разряда, генерируемого в импульсном режиме. На основе взаимной синхронизации также можно получать голограммы в разные моменты существования плазмы как процесс сканирования при ее развитии во времени. Этот подход позволяет наблюдать фазовые изменения, связанные с изменением показателя преломления плазмы, а также оценивать концентрацию электронов в плазменном канале. В соответствии с различными моментами времени были оценены численные значения концентрации электронов для различных областей в плазменном канале.

### Благодарность

Доклад подготовлен в рамках гранта РФФ 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки ТОКАМАК-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Laroussi, M.** Low-temperature plasmas for medicine? // IEEE transactions on plasma science. – 2009. – Т. 37. – №. 6. – С. 714-725.
- [2] **Stepanova, O.** Bactericidal effect of a dielectric barrier discharge plasma jet generated in laminar and preturbulent helium flows / O. Stepanova, O. Rybalchenko, M. Pinchuk, A. Astafiev, O. Orlova, V. A. Spodobin, A. A. Kudryavtsev // Plasma Medicine. – 2017. – Т. 7. – №. 3.
- [3] **Mohamed, H.** Non-thermal plasma as a novel strategy for treating or preventing viral infection and associated disease / H. Mohamed, G. Nayak, N. Rendine, B. Wigdahl, F. C. Krebs, P. J. Bruggeman, V. Miller // Frontiers in Physics. – 2021. – Т. 9. – С. 683118.
- [4] **Roth, J. R.** Industrial plasma engineering: Volume 2: Applications to nonthermal plasma processing. / J. Roth // Reece. – CRC press, 2001. – Т. 2.
- [5] **Almazova, K. I.** Microstructure of a spark discharge in air in a point–plane gap / K. I. Almazova, A. N Belonogov, V. V. Borovkov, E. V. Gorelov, I. V. Morozov, A. A. Tren'kin, S. Y. Kharitonov // Technical Physics. – 2018. – Т. 63. – С. 801-805.
- [6] **Ostrovskaya, G. V.** IV Holographic Methods of Plasma Diagnostics / G. V. Ostrovskaya, Y. I. Ostrovsky // Progress in optics. – Elsevier, 1985. – Т. 22. – С. 197-270.
- [7] **Вовченко, Е. Д.** Лазерные методы диагностики плазмы / Е. Д. Вовченко, А. П. Кузнецов, А. С. Савелов // М.: МИФИ. – 2008. – Т. 1. – С. 3.
- [8] **Зайдель, А. Н.** Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. – №. 5. – С. 105-138.
- [9] **Жданов, С. К.** Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С. К. Жданов, В. А. Курнаев, М. К. Романовский, И. В. Цветков // М.: МИФИ. – 2000. – Т. 184.
- [10] **Самусенко, А. В.** Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. / А. В. Самусенко, Ю. К. Стишков / Уч.-метод. Пособие. – СПб. : ВВМ, 2012. – 649 с.

## Digital holographic interferometry for the assessment of pulsed plasma parameters under atmospheric conditions

*A. M. Kozhevnikova, I. V. Alekseenko, D. V. Schitz*

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, Moscow, Russia

The paper presents a method for observing pulsed spark discharge plasma under atmospheric conditions using digital holographic interferometry, which also allows us to demonstrate the possibility of estimating the electron concentration in cold plasma. The spark discharge was generated under atmospheric conditions between two electrodes at a frequency of 5 kHz, the time of voltage application to the electrodes was 1250 ns. In order to evaluate dynamically changing processes in plasma, a time-scanning system of the discharge was developed, which consists of a hardware-software complex of device synchronization and makes it possible to record a series of holograms with different preset time conditions. It is shown that the contrast change on the phase difference distribution corresponds to the time of spark discharge generation, which also indicates the change in the electron concentration in the plasma. The concentration of electrons at different moments of plasma existence was estimated. The limitations of the proposed method are considered and its applicability to the study of low-temperature pulsed plasma is discussed.

*Keywords:* Digital holographic interferometry, Cold plasma, Plasma diagnostics, Electron density.