



## Влияние индуцированных неоднородностей плотности газа на стабильность плазмы непрерывного оптического разряда<sup>1</sup>

Андросенко В.Н., Котов М.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Непрерывный оптический разряд (НОР) является широкополосным источником света с высокой спектральной яркостью [1, 2]. Одним из факторов, оказывающих влияние на стабильность излучения НОР, может являться неоднородность коэффициента преломления среды, через которую проходит лазерный луч, формирующий и питающий плазму. Особенно это актуально при больших разрядных объемах в колбах или камерах, когда термогравитационная конвекция, возникающая в плазмообразующем газе вокруг НОР [3, 4], создает направленный поток газа вверх в области вблизи плазмы (в центральной части колбы/камеры). Здесь может возникать обратное движение газа вниз в отдаленных от плазмы областях (на периферии). Поскольку конвекция газа вокруг НОР является главным фактором, от которого зависит стабильность излучения плазмы, изучение ее влияния на процессы

формирования и поддержания плазмы НОР является особенно актуальным.

НОР зажигался и поддерживался в сапфировой трубке с внутренним диаметром 15 мм и длиной 70 мм, наполненной ксеноном (Рис. 1).

Инициация и поддержание плазмы проводилось по следующей схеме (Рис. 1(a)): импульсно-периодический лазер YLPP-1-150V-30 (1) генерировал излучение на длине волны 1.06 мкм, направленное через зеркало (2) и сфокусированное линзой (3) в центре сапфировой трубки (4), наполненной ксеноном под давлением 30 бар (газ комнатной температуры). В фокусе луча инициировался оптический пробой. Далее включался непрерывный лазер Raycus RFL-C1500 (5) с выходной мощностью 150–1500 Вт и длиной волны 1.08 мкм, настроенный с помощью линзы (6) на пересечение фокальных перетяжек обоих лазеров. Мощность его излучения превышала пороговую в 3–4 раза. После инициации НОР импульсный лазер выключался, а мощность непрерывного лазера уменьшалась до необходимой для поддержания плазмы. Измерение мощностей излучения обоих лазеров во время эксперимента осуществлялось с помощью измерителей мощности (7).

На Рис. 1(b) показана схема получения изоб-

<sup>1</sup>Работа выполнена по теме государственного задания (№ 123021700057-0).

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН  
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН  
© Андросенко Владислав Николаевич, [androsenko@ipmnet.ru](mailto:androsenko@ipmnet.ru)  
© Котов Михаил Алтаевич, [kotov@ipmnet.ru](mailto:kotov@ipmnet.ru)  
© Соловьев Николай Германович, [solovyov@lantanlaser.ru](mailto:solovyov@lantanlaser.ru)  
© Шемякин Андрей Николаевич, [shemyakin@lantanlaser.ru](mailto:shemyakin@lantanlaser.ru)  
© Якимов Михаил Юрьевич, [yakimov@lantanlaser.ru](mailto:yakimov@lantanlaser.ru)

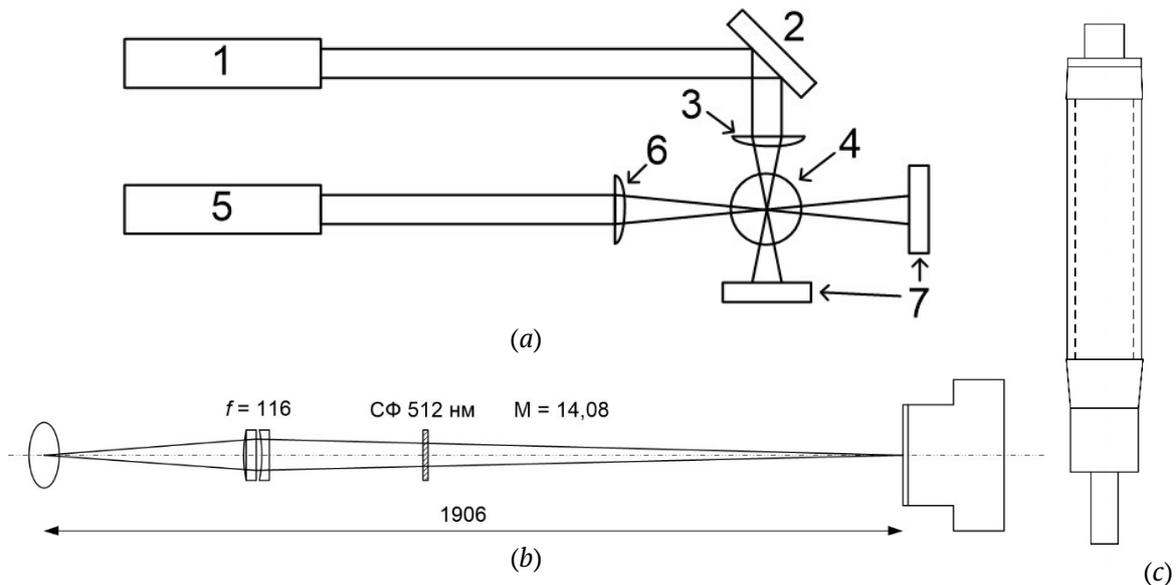


Рис. 1. Схема эксперимента: (a) Инициация НОР с помощью импульсно-периодического лазера, 1 – импульсно-периодический лазер, 2 – зеркало, 3, 6 – фокусирующие линзы, 4 – сапфировая трубка с ксеноном, 5 – лазер непрерывного излучения, 7 – измерители мощности лазерного излучения; (b) Схема получения изображения плазмы; (c) Рисунок трубки с внутренним диаметром 15 мм и длиной 70 мм, наполненной ксеноном под давлением 30 бар, в объеме которой инициировался НОР

ражения плазмы. Свет НОР, проходя через линзу  $f = 116$  мм и светофильтр 512 нм, попадал на объектив и матрицу скоростной камеры. Аналогично шпирен методом с дополнительным источником света за плазмой и щелью в фокусе были получены теневые изображения конвективных пульсаций вокруг НОР и фотографии хаотичного распределения завихрений в объеме трубки (Рис. 1(c)). Съемка проводилась со скоростью 1000 кадров в секунду и экспозицией 50 наносекунд при съемке плазмы и 998 наносекунд при съемке шпирен методом.

На полученных сериях изображений конвективных пульсаций вокруг плазмы НОР (Рис. 2) отмечено нестабильное поведение факела термогравитационной конвекции.

Также обращают на себя внимание неоднородности плотностей в периферийной области разрядного объема. На Рис. 3 показана картина таких остаточных течений в трубке сразу после отключения лазера, поддерживающего НОР. На Рис. 4 представлены прямые фотографии плазмы с низкой выдержкой, при которой видна ее структура. Видно, что остаточные течения горячего газа и, соответственно изменения градиентов плотности и коэффициента преломления среды влияют на прохождение лазерного пучка и траектории пролета квантов лазерного излучения в разрядном объеме. Поэтому распределение интенсивности лазерного излучения при поглощении в плазме изме-

няется соответственно градиентам коэффициента преломления в объеме трубки, от чего и возникает пространственно-временная нестабильность структуры плазмы НОР.

Такое влияние на структуру плазмы НОР можно объяснить большой высотой используемой трубки (Рис. 1(c)) – при ее вертикальном размещении конвективные течения, возникающие около плазмы НОР, успевают набирать большие значения скорости и интерферировать друг с другом. Для оценки этого влияния проводились эксперименты с горизонтальным размещением сапфировой трубки. В этом случае объем циркуляции в конвективной зоне уменьшался по сравнению с вертикальным размещением – характерные размеры по 7.5 мм вверх и вниз от НОР. Непрерывное лазерное излучение подавалось снизу с помощью внеосевого параболического зеркала.

При такой конфигурации НОР остаточные нестабильности горячего газа в периферийной области трубки практически пропадают, и сохраняется стабильность конвективных пульсаций и структуры плазмы НОР (Рис. 5).

Изучение поведения структуры плазмы НОР в разрядном объеме с различными вариантами установки трубки и оптической схемы, фокусирующей лазерное излучение, является определяющим фактором для исследования нестабильностей НОР, возникающих в плазмообразующем газе.

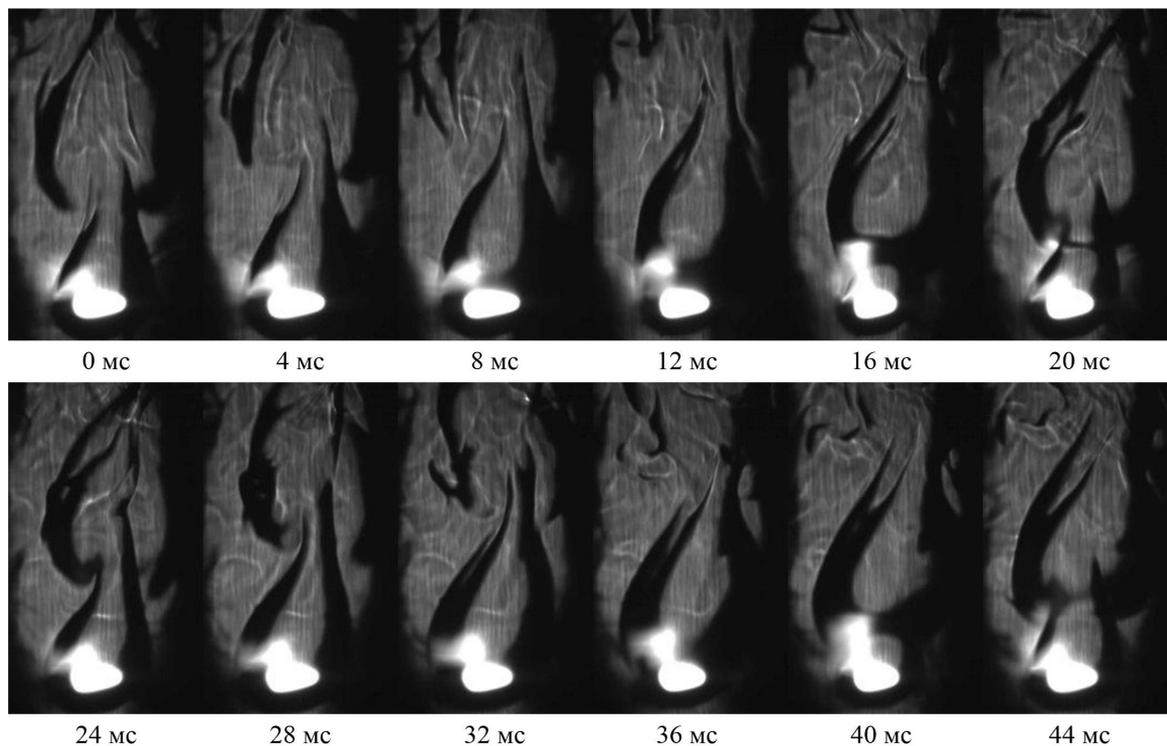


Рис. 2. Серия шлирен фотографий конвективных пульсаций НОР, поддерживаемого мощностью непрерывного лазерного излучения 210 Вт на 1.08 мкм. Выдержка 998 мкс, размер одного кадра  $4.35 \times 7.45$  мм

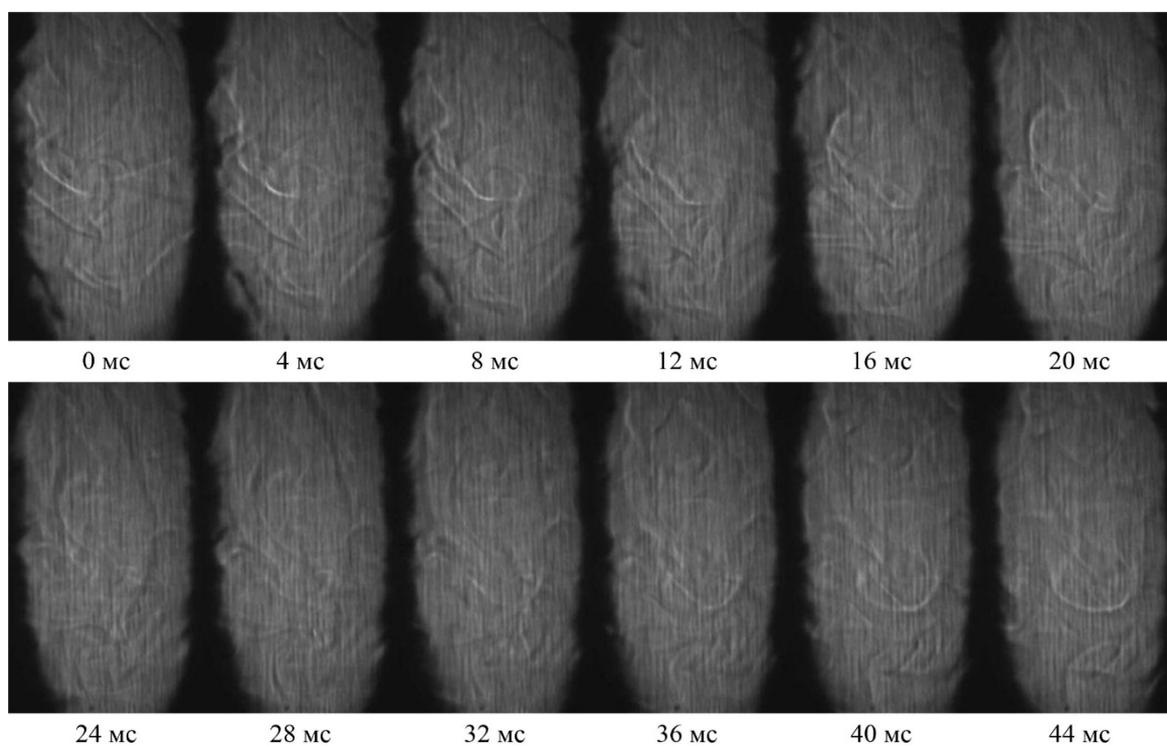


Рис. 3. Серия шлирен фотографий остаточных неоднородностей коэффициента преломления среды, вызванных конвекцией горячего газа вокруг НОР сразу после его выключения. Выдержка 998 мкс, размер одного кадра  $4.35 \times 7.45$  мм

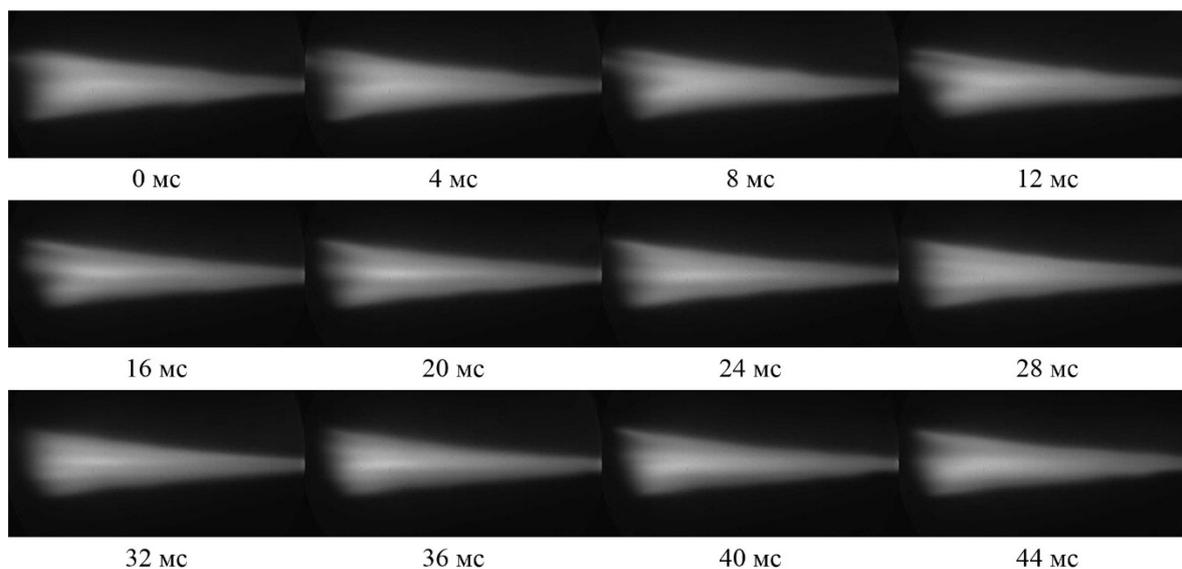


Рис. 4. Серия фотографий плазмы НОР с мощностью непрерывного лазерного излучения 675 Вт через каждые 4 мс. Выдержка 50 мкс., размер одного кадра  $3.8 \times 1.9$  мм

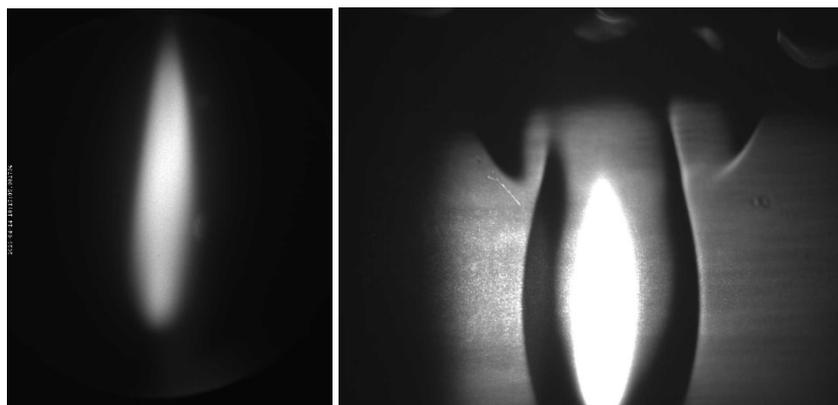


Рис. 5. Фотография плазмы НОР с выдержкой 50 мкс (слева) и ширин фотография конвективных пульсаций НОР с выдержкой 998 мкс (справа) с мощностью непрерывного лазерного излучения 600 Вт. Размер кадров  $2.55 \times 3.18$  мм и  $4.48 \times 3.58$  мм для левого и правого рисунков соответственно

## Список литературы

- [1] Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Взаимодействие лазерного излучения ближнего ИК-диапазона с плазмой непрерывного оптического разряда // Физика плазмы. 2016. Т. 42(1). С. 74–80.
- [2] Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17(2). С. 653. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>.
- [3] Kotov M.A., Lavrentyev S.Yu., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Dynamics of laser plasma convective plume in high pressure xenon // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1675. P. 012073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012073>.
- [4] Kotov M.A., Lavrentyev S.Y., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Y. Oscillations of convective flow around a continuous optical discharge in high-pressure xenon // Plasma Sources Science and Technology. 2022. V. 31(12). P. 12.