

## Движущийся в газе оптический пульсирующий разряд

Г.Н.Грачев, А.Г.Пономаренко, А.Л.Смирнов, П.А.Стаценко, В.Н.Тищенко, С.И.Трашкеев

*С использованием импульсно-периодического излучения CO<sub>2</sub>-лазера создан движущийся в газе оптический пульсирующий разряд (ДОПР), который перемещается вслед за фокусом лазерного пучка с большой скоростью. Разработана методика создания системы фокусировки для стабилизации параметров такого разряда. Погонные затраты энергии излучения на прожигание плазменного канала составляли 3–8 Дж/м. Максимальная скорость движения разряда (~100 м/с) была ограничена условиями опытов. Проведены оценки реализации ДОПР, движущегося на значительном удалении от излучателя.*

**Ключевые слова:** движущийся оптический пульсирующий разряд, импульсно-периодическое лазерное излучение.

Оптический пульсирующий разряд (ОПР) в сверхзвуковом потоке газа, который при большой частоте повторения импульсов ( $f \sim 20 - 100$  кГц) стабильно горит в фокальной области, был реализован в [1–3]. ОПР в потоке газа применяется для аэрофизического моделирования [4], а также представляет интерес для аэрокосмических задач [5–9] и плазмохимии [10].

В настоящей работе с использованием импульсно-периодического излучения CO<sub>2</sub>-лазера [11] создан движущийся оптический пульсирующий разряд (ДОПР) в покоящемся газе. Этот разряд зажигается в перемещающемся фокусе лазерного пучка и при большой скорости перемещения формирует протяженный след ионизованного газа, длина которого зависит от мощности лазера и параметров оптической системы движения фокуса. Генерация мощного излучения с большой частотой повторения импульсов получена в лазерах с постоянной накачкой активной среды и модуляцией добротности резонатора [11, 12]. Как следует из теоретических работ [13, 14], ДОПР может создавать плазменную струю, генерировать волновые поля, спектр которых перестраивается в широком диапазоне, а также прожигать в газе плазменный канал при малых затратах энергии, что важно при решении проблемы управления молнией [15].

В настоящей работе ДОПР создавался с целью изучения новых эффектов, возникающих при воздействии импульсно-периодического излучения на газ, которые основаны на механизме объединения ударных волн [16, 17]. В связи с этим исследование ДОПР потребовало обеспечения стабильности энергии лазерных искр и скорости перемещения на отрезке пути не менее 25 см. Разработана методика расчета и создания зеркально-линзовой системы, позволяющей реализовывать эти условия при почти дифракционном качестве фокусировки пучка. Прове-

дена оценка параметров перспективных ДОПР, перемещающихся с высокими (около километра в секунду) скоростями на значительные (десятки-сотни метров) расстояния.

Работа выполнялась на экспериментальной установке (рис. 1), в которой фокус пучка внутри камеры с аргонном при атмосферном давлении перемещался зеркально-линзовой системой, состоящей из зеркального телескопа Кассегрена и собирающей КСЛ-линзы ( $F = 100$  см, световой диаметр 11 см, расстояние до большого зеркала 85 см). Лазерный пучок вводился через отверстие в неподвижном вогнутом сферическом зеркале (радиус кривизны 47 см, диаметр 24 см), рассеивался малым (диаметр 3.5 см) асферическим зеркалом и далее фокусировался зеркально-линзовой системой в камере. Малое асферическое зеркало с помощью пневмоустройства перемещалось вправо, при этом фокус системы двигался навстречу оптике. Плазма ДОПР зажигалась импульсно-периодическим излучением CO<sub>2</sub>-лазера [11] с модуляцией добротности резонатора. В переднем пике лазерного импульса (~250 нс на полувысоте) содержалось ~70 % энергии, остальная находилась в квазистационарной хвостовой части (~1 мкс). Из-за отражения от поверхностей линзы, поглощения зеркалами и частичного рассеивания пучка элементами конструкции подвижного зеркала и самим зеркалом потери излучения в системе перемещения фокуса достигали ~40 %. Эксперименты проводились при

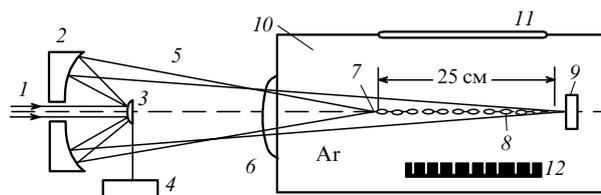


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – ИП излучение; 2, 3 – зеркала телескопа; 4 – устройство перемещения зеркала; 5 – лазерные пучки; 6 – фокусирующая линза; 7 – движущийся фокус; 8 – лазерные искры; 9 – графитовая мишень; 10 – камера; 11 – смотровое окно; 12 – линейка фотодиодов для измерения перемещения свечения плазмы искр.

Г.Н.Грачев, А.Г.Пономаренко, А.Л.Смирнов, П.А.Стаценко, В.Н.Тищенко, С.И.Трашкеев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: root@lateh.nsk.ru; pon\_dlp@mail.nsk.ru, tishenko@plasma.nsk.ru

Поступило в редакцию 13 сентября 2005 г.

$f = 6, 12$  и  $25$  кГц, при которых средняя мощность импульсно-периодического излучения в камере составляла 300, 540 и 800 Вт, а импульсная мощность была равна 150, 125 и 90 кВт соответственно. Начальная плазма канала ДОПР создавалась при облучении графитовой мишени. Скорость перемещения ДОПР регистрировалась по сигналам с линейки фотодиодов ФД-256, расположенных с интервалом 3 см.

Известно [18], что для оптического пробоя аргона атмосферного давления излучением CO<sub>2</sub>-лазера в отсутствие затравочных (первичных) электронов требуется интенсивность  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Вместе с тем ранее [2, 3] нами наблюдался эффект многократного снижения порога зажигания ОПР в быстрых потоках аргона (точнее, снижение порогов поддержания ОПР после зажигания первого оптического разряда) из-за остаточной ионизации и значительной плотности возбужденных атомов. Для выяснения требований к системе перемещения фокуса в настоящей работе предварительно находились пороги зажигания ОПР в покоящемся аргоне с применением линзы из КС1 с углом фокусировки, близким к расчетному углу для системы перемещения фокуса ( $\sim 0.1$  рад). Определена средняя по сечению фокальной перетяжки диаметром 0.2 мм (по уровню 60% прошедшей мощности) пороговая интенсивность, составившая  $180 \pm 15$  и  $140 \pm 10$  МВт/см<sup>2</sup> при  $f = 1.1$  и  $30$  кГц соответственно.

Для получения стабильной (превышающей пороговую) интенсивности была разработана методика расчета зеркально-линзовой системы с асферическим малым зеркалом (алгоритм расчета асферической поверхности подобен использованному в [19]). Задача решалась в дифракционном приближении для всего комплекса, включая резонатор лазера и систему перемещения фокуса. Расчет обеспечивал примерно трехкратное превышение мощности лазера над порогом на участке перемещения фокуса  $\sim 30$  см.

Асферическое зеркало изготавливалось из меди методом программно-управляемого точения алмазным резцом с последующей полировкой и контролем формы поверхности с погрешностью  $\pm 0.5$  мкм.

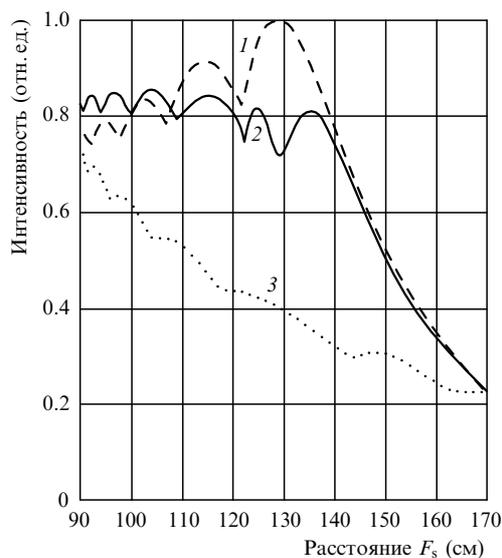


Рис.2. Зависимости интенсивности излучения на оптической оси зеркально-линзовой системы перемещения с рассчитанной (1) и изготовленной (2) поверхностями малого зеркала, а также для зеркальной системы с плоскопараллельным окном вместо линзы (3).

Результаты сравнительных расчетов интенсивности излучения на оптической оси зеркально-линзовой системы (с приведенными выше параметрами) представлены на рис.2 для расчетной поверхности малого зеркала (кривая 1), поверхности изготовленного зеркала (кривая 2) и зеркальной системы с плоскопараллельным окном из КС1 вместо линзы (кривая 3), где  $F_s$  — расстояние от фокального пятна до большого зеркала телескопа.

Эксперименты по зажиганию плазмы ДОПР проводились в диапазоне изменения  $F_s$  от 120 см (местоположение графитовой мишени) до 95 см. Пневмосистема перемещения асферического зеркала обеспечивала его ускорение до  $1200$  м/с<sup>2</sup> и скорость до  $10$  м/с, что определяло максимальную скорость перемещения фокуса  $V_f \sim 100$  м/с, которая поддерживалась постоянной ( $\pm 5\%$ ) в диапазоне перемещения ДОПР. Типичные фотографии плазменного канала ДОПР представлены на рис.3. Практически во всех случаях начальная (от графитовой мишени) часть плазменного канала ДОПР имела прерывистый характер, что, по-видимому, связано с ухудшением качества пучка из-за паразитной обратной связи, возникающей при отражении излучения от сферической поверхности линзы.

ДОПР создавал неразрывный плазменный канал (рис.3,а) при частоте следования импульсов  $f \geq V_f/l$  ( $l$  — длина лазерной искры); в противном случае след состоял из изолированных лазерных искр (рис.3,б). Фотография неподвижного оптического пульсирующего разряда (рис.3,в) соответствует интегральному свечению плазмы множества ( $\sim 12$ ) искр.

Погонные затраты энергии на образование каналов ионизованного аргона составляли от 3 до 8 Дж/м при  $f$  в диапазоне 6–25 кГц соответственно, что много меньше, чем для лазерной искры, создаваемой одним импульсом (см. напр., [20–22]).

Применение разработанной методики расчета системы перемещения фокуса с асферическим зеркалом позволяет сделать вывод о возможности реализации ДОПР в атмосфере на значительных расстояниях. В частности, система перемещения фокуса с диаметром большого зеркала 1 м позволяет получить почти дифракционную фокусировку гауссова пучка на расстоянии 100 м с диаметром перетяжки 2 мм (по уровню 0.8 мощности) и длиной 0.8 м (по уровню 0.5 интенсивности). Для образования в такой перетяжке ДОПР (пороговая интенсивность по оценке составляет  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> [23, 24]) требуется мощность излучения  $\sim 30$  МВт.

Исследования оптического пробоя в движущемся фокусе (в течение одного импульса), а также «чётчных» искр, создаваемых последовательностью лазерных импульсов, проводились в рамках решения проблемы формирования в газе ионизованного канала [20–22, 25–27]. Реализация ДОПР обусловлена возможностью оператив-

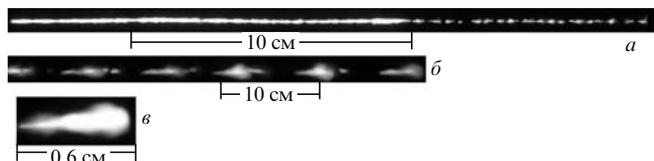


Рис.3. Фотографии плазменных каналов ДОПР при скорости перемещения фокуса  $V_f = 100$  м/с и частоте следования лазерных импульсов  $f = 25$  (а) и  $12$  кГц (б), а также плазменного канала неподвижного ОПР ( $f = 12$  кГц, экспозиция 1 мс) (в).

ного управления многими параметрами: мощностью и частотой повторения импульсов, скоростью и траекторией перемещения ДОПР. В зависимости от характеристик излучения ДОПР может прожигать неразрывный плазменный канал, создавать волновые поля с управляемым спектром на значительном удалении от лазера и моделировать эффекты, аналогичные возникающим при полете ракеты (ударная волна, плазменная струя).

Таким образом, с помощью мощного импульсно-периодического лазерного излучения можно создать оптический пульсирующий разряд, неподвижный или квазинепрерывно движущийся в газе с большой скоростью. При этом формируется неразрывный или дискретный плазменный след. Удаленность ДОПР от лазера, предельная скорость и длина канала разряда ограничены мощностью лазера и характеристиками системы фокусировки. Поэтому несомненно актуальным является создание мощных, движущихся со сверхзвуковой скоростью ДОПР, которые найдут применение в акустике и аэрокосмических приложениях, а также могут быть использованы для прожигания плазменных каналов и создания новых технологий в плазмохимии.

Работа поддержана СО РАН (грант № 152), РФФИ (гранты № 03-02-17716 и № 03-02-17712).

- Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **336**, 466 (1994).
- Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Tischenko V.N., Tretyakov P.K. *Laser Phys.*, **6**, 376 (1996).
- Grachev G.N., Denisov V.I., Menshikov Ya.G., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L. *Techn. Dig. Int. Symposium MPLP-2004* (Novosibirsk, 2004, p. 294).
- Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **351**, 339 (1996).
- Георгиевский П.Ю., Левин В.А. *Письма в ЖТФ*, **14**, 684 (1988).
- Артемьев В.И., Бергельсон В.И., Немчинов И.В. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **55**, 1184 (1991).
- Murabo L.N., Raizer Yu.P. *AIAA Paper*, № 94-2451 (1994).
- Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В. и др. *Инж.-физ. жс.*, **66**, 515 (1994).
- Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **34**, 1143 (2004).
- Demin V.N., Rumjantsev Ju.M., Grachev G.N., Smirnov A.L. *Proc. Conf. ICMAR 2004* (Novosibirsk, 2004, pt III, p. 50).
- Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Shulyat'ev V.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4165**, 185 (2000).
- Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. *Квантовая электроника*, **33**, 753 (2003).
- Тищенко В.Н., Гулидов А.И. *Письма в ЖТФ*, **26**, 77 (2000).
- Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Запрягаев В.И., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **32**, 329 (2002).
- Базелян Э.М., Райзер Ю.П. *УФН*, **170**, 753 (2000).
- Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **33**, 823 (2003).
- Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **34**, 941 (2004).
- Smith D.C. *J. Appl. Phys.*, **41**, 4501 (1970).
- Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Стаценко П.А., Трашкеев С.И. *Труды VI Междунар. конф. «Прикладная оптика»* (С.-Петербург, 2004, т. 1, с. 19; т. 4, с. 3).
- Аскаръян Г.А., Тарасова Н.М. *Письма ЖЭТФ*, **20**, 277 (1974).
- Guy M.W. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**, 33 (1979).
- Иванов О.Г., Окунев Р.И., Пахомов Л.Н., Петрунькин В.Ю., Полонский Л.Я., Пятницкий Л.Н. *ЖТФ*, **57**, 2012 (1987).
- Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1974).
- Копыгин Ю.Д., Сорокин Ю.М., Скрипкин А.М. и др. *Оптический разряд в аэрозолях* (Новосибирск: Наука, СО, 1990).
- Учида Ш., Шимада Е., Ясуда Х., Мотокоши Ш., Яманака Ч., Кавасаки Д., Цубакимото К. *Оптич. журн.*, **66** (3), 36 (1999).
- Ананьев Ю.А., Данилов О.Б., Тульский С.А. А.с. № 577862 (1977).
- Apollonov V.V. *Opt. Eng.*, **44**, 014302 (2005).