

## Газодинамические эффекты взаимодействия неподвижного оптического пульсирующего разряда с газом

В.Н.Тищенко, Г.Н.Грачев, А.А.Павлов, А.Л.Смирнов, Ал.А.Павлов, М.П.Голубев

*Обнаружен эффект отвода энергии из зоны горения неподвижного оптического пульсирующего разряда в горизонтальном направлении – вдоль оси лазерного импульсно-периодического излучения, создающего разряд. Диаграмма направленности потока горячего газа формируется за время действия сотен импульсов. Эффект проявляется при малой длительности импульсов, когда разряд эффективно генерирует ударные волны. При большой длительности импульсов нагретый газ распространяется вверх, как в тепловом источнике.*

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

Стабильность горения оптического разряда, создаваемого непрерывным лазерным излучением, зависит от баланса энергии поглощенного излучения и отводимого тепла [1]. Эти процессы важны [2] и для оптического пульсирующего разряда (ОПР), который создается сфокусированным импульсно-периодическим (ИП) излучением с частотой повторения  $f$  десятки кГц. Для достижения высокой эффективности ( $\sim 70\%$ ) поглощения ИП излучения в ОПР необходимо заменять газ в зоне горения ОПР. Например, перемещать фокус с большой скоростью [3] или создавать ОПР в потоке газа либо в узкой струе [4, 5]. В этом случае скорость перемещения фокальной области, где поглощается излучение («скорость ОПР»), длина искр, их энергия и частота  $f$  взаимосвязаны, что ограничивает диапазон допустимых параметров ОПР. Это ограничение, возможно, будет устранено при использовании рассматриваемого в настоящей работе аномального эффекта: отвода энергии из зоны горения ОПР вдоль оси лазерного пучка. Отметим, что в неподвижном газе стационарный тепловой источник создает восходящий конвективный поток нагретого газа.

В данной работе исследуется влияние параметров лазерного излучения и среды на структуру поля возмущений, создаваемых неподвижным ОПР в окружающем пространстве. Измеряется время формирования квазистационарных структур возмущений, контролируется стабильность поглощения ИП излучения по свечению плазмы ОПР. Описан новый метод теневой визуализации слабых неоднородностей.

ОПР – это лазерные искры, повторяющиеся с большой частотой. Искры создают ударные волны (УВ) и каверны с высокой температурой и низкой плотностью – несколько процентов от плотности невозмущенного газа. Давление в искре выравнивается с давлением окру-

жающего газа за время 5–10 мкс, а плотность – за время  $\sim 1$  мс [6–8], что много больше длительности паузы между импульсами ( $1/f$ ). Поглощение нескольких импульсов излучения должно сопровождаться «выгоранием» газа в фокальной области и, как следствие, повышением порога оптического пробоя, уменьшением интенсивности УВ и эффективности поглощения излучения. Последнее может проявляться в том, что не каждый импульс будет создавать искру.

Необычность обнаруженного в данной работе эффекта состоит в следующем. В изучаемой системе имеются два выделенных направления: направление силы тяжести и ось лазерного излучения. Нагретый газ, так же как и в тепловом источнике, должен отводиться конвективным потоком вверх. Ориентация лазерного пучка, исходя из существующих представлений, не должна была влиять на тепломассоперенос, т.к. излучение поглощается на длине искры  $\sim 0.5$  см, которая сравнима с ее динамическим радиусом  $R_d$ , а он много меньше (примерно в 20 раз) длины наблюдаемого горизонтального потока нагретого газа ( $\sim 10$  см).

Схема эксперимента показана на рис.1. Мощность ИП излучения  $\text{CO}_2$ -лазера недостаточна для оптического пробоя воздуха. Поэтому ОПР создавался в камере объемом 60 л, заполненной инертными газами – аргоном или смесью аргона и гелия, порог пробоя которых меньше, чем воздуха. Длительность лазерных импульсов равна  $\sim 1$  мкс, а переднего пика – примерно 0.3 мкс. В некоторых случаях использовались периодические пучки импульсов или импульсы длительностью  $\sim 30$  мкс. Частота повторения  $f = 6 - 25$  кГц. При больших  $f$  энергия импульсов была ниже порога горения ОПР. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составляет  $\sim 3$  см, а ее фокусное расстояние – 17 см. Фотодетектор регистрировал свечение лазерных искр, что позволяло судить о стабильности поглощения лазерных импульсов. Диаметр области, в которой осуществлялась оптическая диагностика, равен 10 см.

В работе представлены фрагменты снимков, демонстрирующие возмущения среды. Стенки камеры не влияли на результаты измерений (см. ниже). Для регистрации максимальной длины области возмущений фокус и

В.Н.Тищенко, Г.Н.Грачев, А.Л.Смирнов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: tishenko@mail.nsk.ru, grachev@laser.nsc.ru  
А.А.Павлов, Ал.А.Павлов, М.П.Голубев. Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: pavalex@itam.nsc.ru

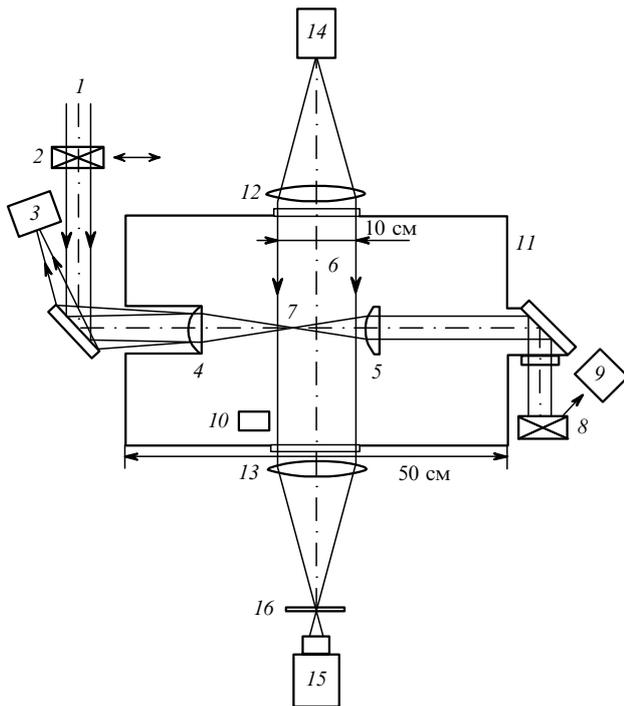


Рис.1. Схема измерений:

1 – пучок ИП лазерного излучения; 2, 8 – измерители (ТИ-4) средней мощности излучения; 3, 9 – датчики (ФД511-2) формы лазерного импульса; 4, 5 – линзы с фокусными расстояниями 17 и 13 см; 6 – область оптической диагностики; 7 – ОПР; 10 – датчик свечения лазерных искр; 11 – камера; 12, 13 – коллиматорные линзы теневой системы визуализации; 14 – лазерный источник света; 15 – телекамера PCO.SensiCam; 16 – визуализирующий транспарант.

горящий в нем ОПР смещены к краю области теневой диагностики (рис.2). В подписях к рис.2–7 приведены энергии импульсов  $q_{in}$  и  $q_{ab}$ , а также средние мощности  $W_{in}$  и  $W_{ab}$  подводимого и поглощенного излучения соответственно. На рис.2, 4–6 указано время  $t_{del}$  задержки

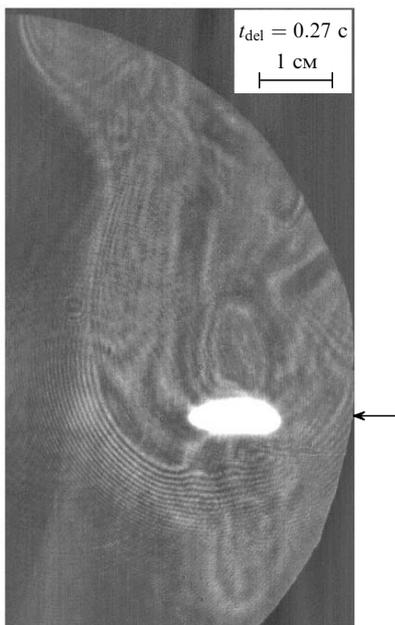


Рис.2. Конвективный поток, создаваемый ОПР при длительности лазерных импульсов  $\sim 30$  мкс, частоте  $f = 11$  кГц, средних мощностях  $W_{in} = 1.7$  кВт и  $W_{ab} = 0.45$  кВт, энергиях импульсов  $q_{in} = 0.155$  Дж и  $q_{ab} = 0.041$  Дж. Стрелка показывает направление распространения лазерного излучения.

момента фоторегистрации относительно момента зажигания ОПР.

Неоднородности плотности газа визуализировались с использованием теневых методов. Оптическая схема, представленная на рис.1, содержит коллиматорный (12) и приемный (13) объективы, лазерный источник света 14, телекамеру PCO.SensiCam 15, позволяющую получать серию изображений, синхронизованных от внешних импульсов. Экспозиция регулируется в диапазоне 500 нс– $10^3$  с, пространственное разрешение по полю изображений составляет  $1280 \times 1040$  пикселей.

На первом этапе применялась «прямотеневая» схема (без визуализирующего транспаранта), чувствительность которой зависит от степени расфокусировки изображения. Регистрируются вторые производные от интеграла оптического пути (плотности) в направлении, ортогональном направлению распространения излучения. Данная схема обладает существенным недостатком, заключающимся в геометрическом искажении изображения исследуемого объекта, растущим с увеличением чувствительности. Типичные теневые изображения можно видеть на рис.3.

Для увеличения чувствительности и уменьшения геометрических искажений исследуемого объекта в дальнейшем нами применялась теневая схема с использованием в качестве визуализирующего транспаранта пластины 16 (см. рис.1) из фототропного стекла (далее АВТ – адаптивный визуализирующий транспарант). Как известно, чувствительность теневых методов на основе ножа Фуко обратно пропорциональна размеру изображения источника света. Для ее увеличения можно использовать когерентное лазерное излучение с малым дифракционным пятном. Однако при этом наблюдаются нежелательные

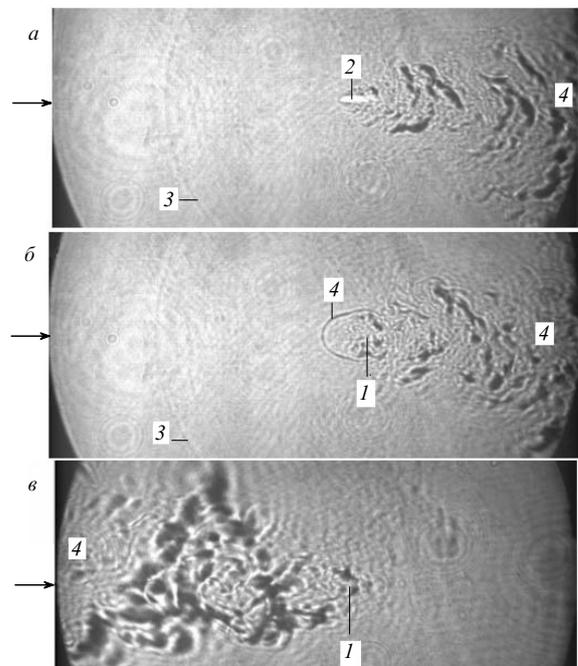


Рис.3. Теневые снимки возмущений, создаваемых ОПР в аргоне при  $f = 12$  кГц,  $W_{in} = 1.26$  кВт,  $q_{in} = 0.105$  Дж (интервал между кадрами 0.125 с) (а, б) и в смеси Ar:He = 0.7:0.3 атм при  $f = 25$  кГц,  $W_{in} = 1.82$  кВт,  $q_{in} = 0.07$  Дж (в):

1 – фокальная область; 2 – искра; 3 – фронт УВ; 4 – поток нагретого газа из зоны ОПР; горизонтальный размер кадра 10 см; стрелки показывают направление распространения лазерного излучения.

шумы из-за дифракции на кромке ножа. Кроме того, увеличивается влияние на настройку схемы случайных сдвигов оптических элементов и вибраций установки.

При использовании АВТ воздействие сфокусированного излучения на материал АВТ приводит к затемнению участка с характерными размерами, равными размеру дифракционного пятна. При этом существенно повышается чувствительность системы в результате достижения минимально возможного размера изображения источника света, а также увеличения относительного изменения яркости регистрируемого изображения в областях возмущений. Уменьшается также влияние дифракции на визуализирующем транспаранте.

Для тонкого АВТ выражение для коэффициента поглощения  $G$  можно представить в виде

$$G = \frac{I\theta_{ac}}{I\theta_{ac} + \theta_{dac}} \{1 - \exp[-(I\theta_{ac} + \theta_{dac})t]\} G_{max}, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность падающего на транспарант излучения;  $G_{max}$  – максимально возможный коэффициент поглощения;  $t$  – время. Коэффициенты  $\theta_{ac}$  и  $\theta_{dac}$  зависят от свойств материала АВТ и характеризуют скорость активации и дезактивации поглощающих центров. Величина  $\tau_{ac} = 1/(I\theta_{ac})$  – характерное время активации, а  $\tau_{dac} = 1/\theta_{dac}$  – время дезактивации поглощающих центров. Для используемого нами материала  $\tau_{dac} \sim 10^2$  с, а время активации в области фокусировки зондирующего излучения (при отсутствии возмущений)  $\tau_{ac} \sim 1$  с. В качестве источника света использовался неодимовый лазер мощностью 4 мВт с диодной накачкой и удвоением частоты ( $\lambda = 0.53$  мкм).

Важными для понимания работы АВТ являются следующие предельные случаи:

$$G \approx \frac{I\theta_{ac}}{I\theta_{ac} + \theta_{dac}} G_{max} \quad \text{при } t \gg 1/(I\theta_{ac} + \theta_{dac}), \quad (2)$$

$$G \approx G_{max} \quad \text{при } t \gg 1/(I\theta_{ac} + \theta_{dac}), I\theta_{ac} \gg \theta_{dac}, \quad (3)$$

$$G \approx \frac{I\theta_{ac}}{\theta_{dac}} G_{max} \quad \text{при } t \gg 1/(I\theta_{ac} + \theta_{dac}), I\theta_{ac} \ll \theta_{dac}, \quad (4)$$

$$G \approx I\theta_{ac} G_{max} t \quad \text{при } t \ll 1/(I\theta_{ac} + \theta_{dac}). \quad (5)$$

Почернение АВТ в области фокусировки прошедшего через исследуемый объем без искажений излучения, на которое приходится большая часть энергии, описывается соотношениями (2) и (3). Соответствующие области изображения будут максимально затемнены. Излучение, испытывающее малые угловые отклонения даже на слабой неоднородности, проходит через менее затемненный участок АВТ. Почернение при этом описывается соотношением (4) для стационарных неоднородностей и соотношением (5) для нестационарных. Эти неоднородности проявляются на изображении в виде более ярких участков. Дополнительное преимущество метода состоит в том, что сильные возмущения приводят к затемнению соответствующих участков АВТ, так что просветление изображения в областях больших градиентов плотности (например, вблизи фронтов УВ) существенно менее выражено, чем при использовании обычной схемы, и не подавляет более слабые возмущения, присутствующие на

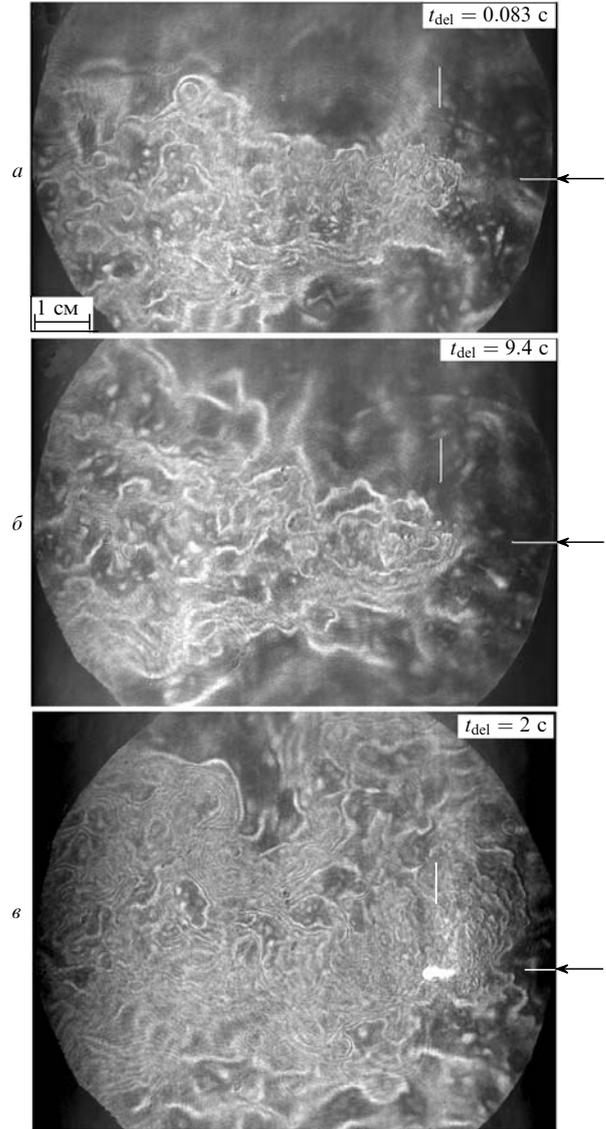


Рис.4. Типичные картины возмущений, создаваемых ИП излучением при  $f = 12$  кГц,  $W_{in} = 0.894$  кВт,  $W_{ab} = 0.256$  кВт,  $q_{in} = 0.0745$  Дж,  $q_{ab} = 0.0213$  Дж (а, б) и пугами импульсов (по три импульса с интервалом  $\sim 12$  мкс) с частотой  $F = 12$  кГц,  $W_{in} = 1.29$  кВт,  $W_{ab} = 0.41$  кВт, энергией пугов  $Q_{in} = 0.108$  Дж,  $Q_{ab} = 0.034$  Дж (в). Стрелки показывают направление распространения лазерного излучения, фокус находится на пересечении горизонтальных и вертикальных белых штрихов. Снимки сделаны в одном масштабе.

их фоне. Схема является самоподстраивающейся, что упрощает измерения. Фотографии, кроме показанных на рис.3, сделаны с использованием АВТ, что позволило повысить чувствительность и качество визуализации поля возмущений плотности (ср., напр., рис.3 и 4).

На рис.2 представлен теневой снимок возмущений, которые создает ОПР, действующий в режиме, близком к режиму непрерывного оптического разряда. Длительность лазерных импульсов составляет  $\sim 30$  мкс. Передний пик создает искру и слабую УВ, т.к. энергия в этом пике мала по сравнению с полной энергией импульса. Время расширения лазерной плазмы и выравнивания давлений в камере и окружающем газе равно  $\sim 5$  мкс (расчеты), поэтому поглощение хвоста импульса не сопровождается формированием УВ. Из рис.2 видно, что над областью ОПР наблюдается восходящий поток газа, как в стационарном тепловом источнике. Из-за импульс-

ного подвода энергии структура возмущений нестационарна как в области размером несколько миллиметров, так и во всей области наблюдения ( $\sim 5$  см). Область возмущений сохраняет вытянутую вверх форму, а форма ее границы изменяется с характерным временем менее 0.08 с (время между кадрами при видеосъемке). Отсутствие УВ – основное отличие этой картины от картины возмущений при горении ОПР в режиме, рассматриваемом ниже, когда поток возмущений направлен горизонтально вдоль оси пучка.

На рис.3, так же как и на рис.4–7, представлены теневые снимки для случая, когда ОПР создается импульсами, длительность ( $\sim 1$  мкс) которых меньше времени теплового расширения искры. Здесь ОПР – источник периодических УВ. Диаграмма направленности возмущений ориентирована вдоль оси пучка. На снимке поток в вертикальном направлении отсутствует. Видеокамера включалась через  $\sim 1$  с после зажигания ОПР. Частота повторения кадров равна 12 Гц. От кадра к кадру на снимках наблюдаются изменения мелкой структуры возмущений и очертаний границ, а также небольшое колебание оси диаграммы относительно оси лазерного излучения. На рис.3,а видно свечение искры. Снимок сделан через малое время после очередного оптического пробоя. На рис.3,б,в свечения нет. Снимки сделаны с большой задержкой, и плазма ближайшей по времени искры остыла до температуры, при которой свечение не воспринималось камерой. На рис.3,б зафиксирован момент отхода УВ от создавшей ее искры. На всех фотографиях наблюдается одна и та же картина: в невозмущенном газе регистрируются УВ, а в направлении распространения излучения – хаотическое поле пульсаций плотности, при взаимодействии с которым УВ рассеиваются. На расстоянии от области ОПР более  $10R_d \approx 5$  см (где  $R_d$  – динамический радиус искр) скачок давления на фронте УВ мал. УВ вырождается в акустическое возмущение. Далее используется единый термин – ударная волна.

Направление потока возмущений (по направлению распространения излучения или навстречу ему) зависит от мощности лазера. Точнее, от того, насколько энергия импульсов превышает порог оптического пробоя, который зависит от сорта газа. Это иллюстрирует рис.3, который соответствует максимальной мощности лазера, но разным составам смеси и частотам. В аргоне при  $f = 12$  кГц энергия импульсов значительно превышает порог пробоя, поэтому поле возмущений ориентировано вдоль оси пучка (см. рис.3,а,б). Из рис.3,а видно, что искры создаются в плотном газе и эффективно преобразуют лазерное излучение в УВ. Из показаний датчика давления следует, что каждый лазерный импульс создает УВ и ее амплитуда стабильна от импульса к импульсу.

При увеличении содержания гелия в смеси Ar–He (полное давление  $\sim 1$  атм) повышаются скорость звука и порог оптического пробоя газа. На частоте  $f = 12$  кГц направление потока возмущений в смеси Ar:He = 0.7:0.3 атм, как и в чистом аргоне, совпадает с направлением распространения излучения. В той же смеси, но при  $f = 25$  кГц, как видно из рис.3,в, пульсации распространяются навстречу излучению. Фокус находится в сильно возмущенном газе. При некоторых составах смеси в процессе горения ОПР происходит смена направления потока возмущений. Поток навстречу излучению наблюдался также в опытах, в которых ОПР создавался излучением малой мощности.

Формирование горизонтальных потоков возмущений и их типичные структуры показаны на рис.4–6, которые получены с использованием усовершенствованного теневого метода. Здесь ОПР создавался при пониженной мощности излучения  $W_{in} \approx 0.9$  кВт (по сравнению с  $W_{in}$  для рис.3). Длительность импульсов составляла  $\sim 1$  мкс. Стабильность горения ОПР или его неустойчивость (отдельные импульсы или их последовательности не создавали искр) контролировалась с помощью теневых фотоснимков и по свечению лазерной плазмы, которое регистрировалось фотодиодом. При зажигании ОПР видеосъемка проводилась в течение  $\sim 10$  с, частота повторения кадров была равна 12 Гц.

Типичные картины возмущений, соответствующие стабильному горению ОПР и горизонтальной ориентации потока, показаны на рис.4,а,б. Уже через  $\sim 0.083$  с после зажигания ОПР возмущения формировались на всей длине области наблюдения. Качественного или количественного отличия первых кадров от последних не наблюдалось. Это указывает на то, что горизонтальный вынос возмущений не связан с влиянием стенок камеры. В то же время, как и для соответствующего рис.3,а,б режима, очертания диаграммы и ее мелкая структура менялись от кадра к кадру. При пониженной мощности, в отличие от рис.3, фокус расположен в возмущенном газе (рис.4). В процессе горения ОПР положение искр меняется менее чем на  $\sim 1$  мм.

Очевидно, что отвод горячего газа вдоль оси пучка должен сопровождаться притоком холодного газа из окружающего ОПР пространства. Это взаимосвязанные процессы, в которых отвод первичен. О наличии притока косвенно указывает стабильность горения ОПР, наблюдаемая на осциллограммах свечения плазмы ОПР. Каждому лазерному импульсу соответствует пик сигнала на осциллограмме.

При неустойчивом горении ОПР структура поля возмущений качественно иная. Можно выделить две типичные картины. Для первой характерны возмущения, распространяющиеся навстречу излучению (см. рис.3,в), или неустойчивая (меняющаяся во времени) ориентация диаграммы потока. Для второй характерны режимы горения ОПР, когда возмущения заполняют все поле наблюдения, как это показано на рис.4,в, где ОПР создавался цугами лазерных импульсов с частотой  $F \approx 12$  кГц. Каждый цуг содержал три импульса с интервалом между ними  $\sim 12$  мкс.

Динамику формирования диаграммы направленности генерируемых ОПР возмущений иллюстрирует рис.5. Показаны фотоснимки возмущений по прошествии различного времени после зажигания ОПР. Каждый снимок соответствует одному зажиганию ОПР. Камера включалась с задержкой  $t_{del}$  относительно первой искры ОПР, поскольку при одном зажигании динамику проследить невозможно из-за малой частоты повторения кадров: к моменту экспозиции второго кадра диаграмма потока возмущений уже сформировалась. Из снимков видно, что после зажигания ОПР размер зоны возмущений со временем растет. Ее структура и очертания неустойчивы, пульсируют, выделенного направления при  $t < 25$  мс нет. ОПР окружен сильно неоднородной средой. Ударные волны наблюдаются при  $t < 0.5$  мс, когда зона возмущений еще мала и УВ слабо рассеиваются на них. За время  $t \sim 25$  мс излучение создает  $\sim 300$  искр, поглощенная энергия составляет  $\sim 5$  Дж. Диаграмма направленности

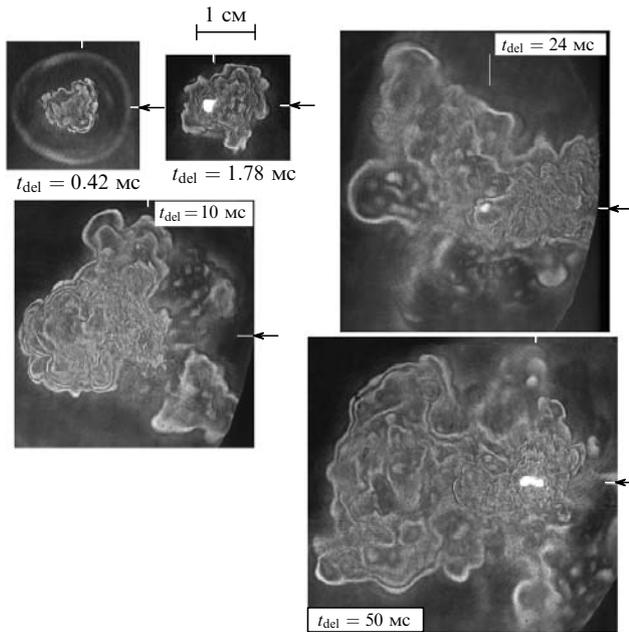


Рис.5. Теневые снимки возмущений при  $f = 12$  кГц,  $W_{in} = 0.88$  кВт,  $W_{ab} = 0.23$  кВт,  $q_{in} = 0.073$  Дж,  $q_{ab} = 0.019$  Дж. Стрелки показывают направление распространения лазерного излучения, фокус находится на пересечении горизонтальных и вертикальных белых штрихов. Снимки сделаны в одном масштабе.

потока возмущений формируется к моменту  $t \sim 50$  мс. При  $t \sim 0.08$  с ( $\sim 1000$  импульсов) поток возмущений перекрывает всю область наблюдения ( $\sim 10$  см, рис.4,а). Таким образом, характерное время перехода от хаотических пульсаций плотности газа к их направленному движению вдоль оси пучка составляет  $0.03 - 0.05$  с, чему соответствует оценка осевой скорости  $V \sim 0.1/0.05 = 2$  м/с. Отвод поглощаемой в ОПР энергии при столь малых  $V$  возможен только в том случае, если наблюдаемый на снимках возмущенный газ имеет высокую температуру. В противном случае скорость потока должна быть  $\sim 100$  м/с. Отметим, что длина возмущенной области превышала расстояние между ОПР и линзой 5 (рис.1), что приводило к ее термическому повреждению через 20–30 зажиганий ОПР.

Для понимания природы рассматриваемого эффекта важно выяснить, какие элементарные возмущения создает ОПР. Известно, что для одиночной искры (рис.6,а) на стадии адиабатического расширения ( $t < 10$  мкс) лазерной плазмы формируются УВ и каверна. Первичность роли УВ показана выше: горячий газ каверн отводится в горизонтальном направлении, если УВ сильные, в противном случае – в вертикальном направлении. К элементарным возмущениям можно отнести вихрь в виде тора (далее кольцо), создаваемый одиночной лазерной искрой [9]. При  $t > 30$  мкс на оси искры навстречу лазерному излучению (энергия  $\sim 1$  Дж) формируется струя холодного газа (скорость  $\sim 150$  м/с, длина  $\sim 1$  см) [9, 10]. При этом плазма вытесняется на периферию в радиальном направлении, образуя расширяющееся вихревое кольцо, которое наблюдалось в течение  $\sim 1$  мс.

Типичные элементарные структуры поля возмущений, создаваемые неподвижным и движущимся ОПР, показаны соответственно на рис.6 и 7. Когда неподвижный ОПР стабилен, возмущения плотности на снимках выглядят хаотичными (см. рис.4). В связи с этим поиск структур проведен при пониженной мощности излуче-

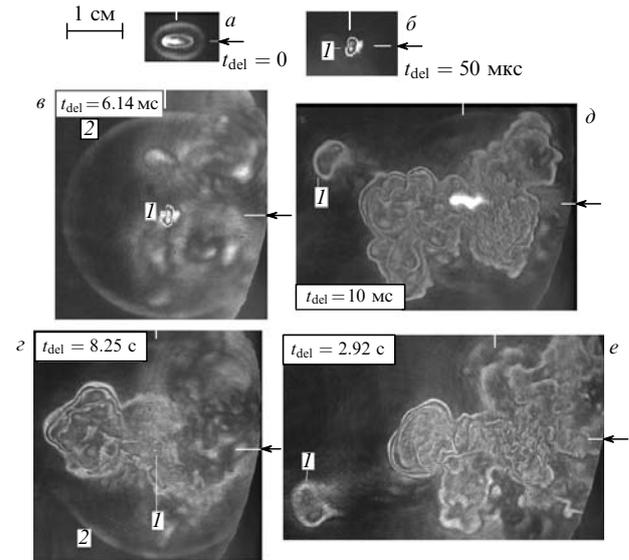


Рис.6. Типичные картины возмущений (1 – кольцо, 2 – фронт УВ), создаваемых неподвижным ОПР от первой искры (а, б) и при повторном (самопроизвольном) поджиге ОПР, который перед этим погасал на время менее 0.1 с (в–е). ИП излучение:  $f = 12$  кГц,  $W_{in} = 0.57$  кВт,  $q_{in} = 0.048$  Дж (а–г). Цуги импульсов (по три импульса с интервалом  $\sim 11$  мкс):  $F = 12$  кГц,  $W_{in} = 1.29$  кВт,  $W_{ab} = 0.41$  кВт, энергия цугов  $Q_{in} = 0.108$  Дж,  $Q_{ab} = 0.034$  Дж (д, е). Стрелки показывают направление распространения лазерного излучения, фокус находится на пересечении горизонтальных и вертикальных белых штрихов. Снимки сделаны в одном масштабе.

ния, когда неподвижный ОПР нестабилен: в процессе горения он погасает на время 0.1 – 1 мс, что видно по свечению искр и теневым снимкам. Фотографии на рис.6,а, б соответствуют возмущениям, которые созданы первой искрой ОПР. На рис.6,в–е показаны возмущения для случая, когда ОПР зажигается после паузы.

На рис.7 представлены теневые снимки возмущений, создаваемых движущимся ОПР. При большой «скорости ОПР» каверны изолированы между собой и не влияют друг на друга (рис.7,а–в), а при малой они частично перекрываются (рис.7,г). На рис.7,а, б каверна, расположенная слева, является последней, созданной излучением к моменту регистрации. Указанное на рис.7 время отсчи-

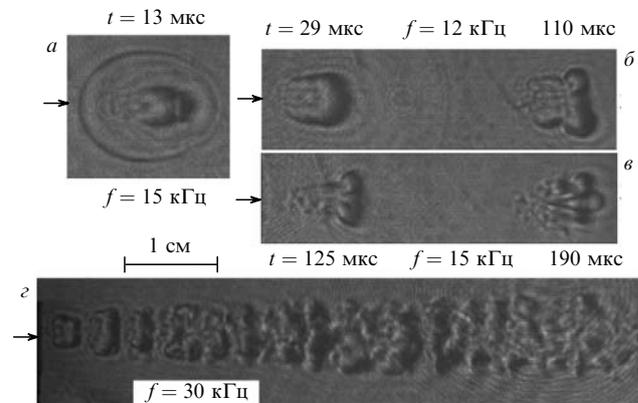


Рис.7. Теневые снимки возмущений, создаваемых движущимся ОПР (фокус ИП излучения перемещается справа налево) при «скорости ОПР»  $v \sim 300$  м/с,  $q_{ab} \sim 40 - 50$  мДж,  $q_{in} = 2.5q_{ab}$  (а–в) и  $v \sim 100$  м/с,  $q_{ab} \sim 24$  мДж,  $q_{in} = 2.5q_{ab}$  (г);  $t$  – время существования искр. Стрелки показывают направление распространения лазерного излучения. Снимки сделаны в одном масштабе.

тывается относительно момента создания искры. Например, на рис.7,б левая каверна – последняя, она создана искрой 29 мкс назад. Правая каверна (от предыдущей искры) существует  $\sim 110$  мкс. На всех снимках (рис.6 и 7) наблюдается возмущение газа в виде кольца. Начальная стадия существования колец показана на рис.6,б–г. Кольцо на рис.6,б образовалось в результате первого пробоя после кратковременного погасания ОПР, видны также возмущения, созданные до срыва горения ОПР. Кольцо на начальной стадии существования, сформировавшееся по прошествии большого времени после повторного зажигания ОПР, показано на рис.6,г. Наиболее интересными представляются кольца на значительном расстоянии от области ОПР (рис.6,д, е).

Ни УВ, ни вихревые кольца или струя без привлечения дополнительного механизма не объясняют ни большого времени (сотни импульсов) формирования потока возмущенного газа, ни самого факта его распространения вдоль горизонтальной оси излучения на большое расстояние, в 20 и более раз превышающее длину искры и ее динамический радиус.

В то же время наблюдаемый эффект не является следствием влияния стенок камеры – сноса возмущений отраженными УВ или потоком газа, который мог бы возникнуть в результате нагрева газа в камере. Это следует из количественных оценок и результатов измерений, приведенных ниже. Эффект проявляется менее чем через 0.1 с, когда поглощенная в ОПР энергия еще мала для прогрева и разгона примерно 60 л газа, содержащегося в камере. Кроме того, через 0.1 с и через 10 с структура потока возмущений одна и та же (см. рис.4,а и б). В отдельных экспериментах специально создавался поток газа с помощью вентилятора, который был расположен на дне камеры и предназначен для перемешивания аргона и гелия после их напуска в камеру. Слабое влияние вентилятора наблюдалось на теневых снимках лишь в режиме формирования ОПР длинными импульсами, когда поток горячего газа отводится от области ОПР в вертикальном направлении. В этом случае верхняя часть восходящего потока (на расстоянии более 3 см от области ОПР) колеблется относительно его оси и более неоднородна, чем на рис.2, который получен при выключенном вентиляторе.

Оценивая возможное влияние камеры и ее элементов на рассматриваемый эффект, следует принимать во внимание отраженные УВ и формирование потока газа в объеме камеры. На создание потока горячего газа из области горения ОПР в направлении распространения излучения могли бы влиять УВ, отраженные от фокусирующей линзы (см. рис.1). Время прохождения УВ от области ОПР до линзы и обратно  $t_1 \sim 2L_1/c_0 \sim 1 - 3$  мс, что много меньше времени формирования диаграммы возмущений  $t_2 \sim 50$  мс. Здесь  $L_1 \approx 17$  см – расстояние от области ОПР до линзы, а  $c_0 = 320$  м/с – скорость звука в аргоне. Отраженные УВ не видны на теневых фотосним-

ках, т. к. при  $2L_1/R_d \sim 34/0.5 = 68$  они вырождаются в слабые акустические колебания. Отметим также, что рис.3 получен с использованием экспериментальной схемы работы [3], где линзы 4 и 5 отсутствовали, а фокусирующая система находилась вне камеры. Ближайшей отражающей поверхностью являлась стенка камеры, которая находилась на расстоянии 16 см от области ОПР по направлению распространения излучения. Из рис.3 видно, что наличие этой стенки никак не повлияло на исследуемый эффект. Время  $t_2$  и поглощенная за это время энергия ( $\sim 10$  Дж) слишком малы для формирования потока газа в объеме камеры.

Отметим, что стабильность ОПР указывает на то, что в зону горения поступает холодный газ, компенсирующий отвод горячего газа как в вертикальном, так и горизонтальном направлении.

Таким образом, при малой длительности лазерных импульсов поглощаемая в ОПР энергия отводится УВ и потоком газа, движущимся в направлении распространения лазерного излучения. При большой длительности импульсов отвод происходит в вертикальном направлении конвективным потоком, как в тепловом источнике. Для разработки физической модели исследуемого эффекта необходимы эксперименты с ОПР в воздухе, что возможно при мощности ИП лазера  $\sim 5$  кВт и более. Методы масштабирования мощных лазеров разработаны в [11].

Авторы выражают благодарность А.Г.Пономаренко за поддержку исследований оптического разряда.

Работа поддержана РФФИ (грант № 06-08-01192) и СО РАН (проект № 152).

1. Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1974, с. 308).
2. 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** (10), 941 (2004).
3. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Стаценко П.А., Тищенко В.Н., Трашкев С.И. *Квантовая электроника*, **35** (11), 973 (2005).
4. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **336** (4), 466 (1994).
5. Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. *Инж.-физ. журн.*, **66** (5), 515 (1994).
6. Кабанов С.Н., Маслова Л.И., Тархова Т.И., Трухин В.А., Юров В.Т. *ЖТФ*, **60** (6), 37 (1990).
7. Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А.В., Никитин С.А., Посух В.Г., Третьяков П.К., Шайхисламов И.Ф. *Письма в ЖТФ*, **22** (24), 30 (1996).
8. Бельков Е.П. *ЖТФ*, **44** (9), 1946 (1974).
9. Буфетов И.А., Прохоров А.М., Федоров В.Б., Фомин В.К. *ДАН СССР*, **261** (3), 586 (1981).
10. Кондрашев В.Н., Родионов Н.Б., Ситников С.Ф., Соколов В.И. *Препринт № ИАЭ-4154/7* (М., Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, 1985).
11. Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).