

Quasi-Stationary Plasma Sustaining by Means of Periodic-Pulsed Laser Radiation of Pre-Breakdown Intensity

V.P. Zimakov, N.G. Solov'ev, A.N. Shemyakin, A.O. Shilov, M.Yu. Yakimov

*Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia
yakimov@lantanlaser.ru*

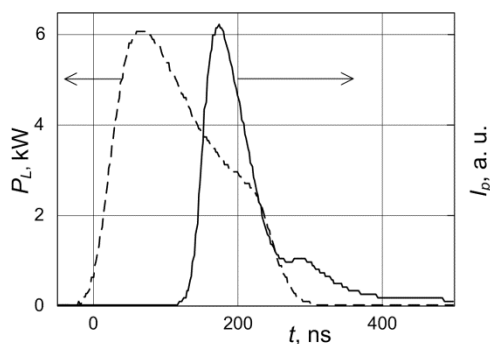
Abstract

The phenomenon of sustaining a stable radiant plasma filament by laser radiation pulses with repetition rate of $f_r = 50 \div 100$ kHz, pulse length of $\tau = 100 \div 200$ ns, pulse power of $P_L = 3 \div 6$ kW, being focused in xenon under pressure $p = 8 \div 16$ bar has been observed. Radiation intensity was set just below the threshold of the laser spark, thus the phenomenon may be treated as “pre-spark”.

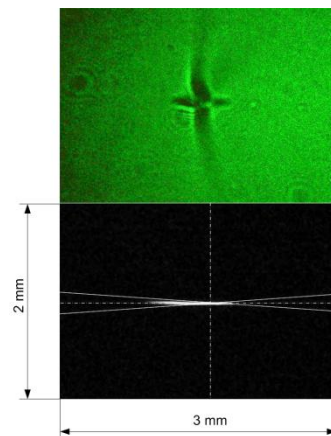
A luminous zone with diameter of $d \sim 30 \div 40$ μm and length up to $l \approx 1$ mm was observed in the experiments. Being initiated by a flash of a laser spark or another way, stable luminous zone existed near the focus, in the highest laser beam intensity region, in a broad laser pulse energy range $E_L = 0.4 \div 1$ mJ. Pulse energy threshold was decreasing with pressure and the filament length and brightness was increasing with energy.

Laser pulse energy deposited in the plasma filament zone led to refractive index gradients in the gas, which caused strong distortion of the laser beam passed through the interaction zone. Intense convective flows emitting from the interaction zone, well seen on the shadow pictures, are another display of periodic-pulsed laser radiation affecting the gas.

Keywords: laser plasma, POD, laser beam refraction, laser-induced convection.



Waveforms of laser pulse $P_L(t)$ (dashed line) and integral plasma radiation flux intensity $I_p(t)$ from interaction zone of focused laser beam with Xe at $p = 15 \pm 1$ bar, focusing parameter $F = 7$, pulse width $\tau_{FWHM} = 170$ ns, repetition rate $f_r = 50$ kHz



Shadow picture of interaction zone and generated convective flow (top photo) and corresponded luminous zone (bottom photo). Lines show laser beam near the focus ($F = 7$). Beam is directed from left to right

УДК 533.915.082.5; 537.521.7(04)

Поддержание квазистационарной плазмы излучением импульсно-периодического лазера предпробойной интенсивности

В.П. Зимаков, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, А.О. Шилов, М.Ю. Якимов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, 101
yakimov@lantanlaser.ru*

Аннотация

Обнаружено явление поддержания стабильного светящегося плазменного шнура под действием повторяющихся с частотой $f_r = 50 \div 100$ кГц импульсов лазерного излучения длительностью $\tau = 100 \div 200$ нс с импульсной мощностью от $P_L = 3 \div 6$ кВт при фокусировке в ксеноне под давлением $p = 8 \div 16$ бар. Интенсивность излучения была немного ниже необходимой для лазерного пробоя газа, т.е. данное явление можно рассматривать как предпробойное.

В опытах наблюдалась светящаяся область диаметром $d \sim 30 \div 40$ мкм и длиной до $l \approx 1$ мм. Будучи инициированным вспышкой лазерной искры или другим способом, зона свечения стабильно существовала вблизи фокуса в области максимальной интенсивности лазерного луча в достаточно широком диапазоне изменения энергии возбуждающего лазерного импульса $E_L = 0.4 \div 1$ мДж, причем при увеличении давления снижался энергетический порог явления, а с ростом энергии увеличивались длина и яркость свечения шнура.

Энерговыведение в области плазменного шнура приводило к появлению градиентов коэффициента преломления в газе, что вызывало сильное искажение пучка лазерного излучения, проходившего через область взаимодействия. Другим проявлением воздействия импульсно-периодического излучения на газ оказались вытекающие из зоны взаимодействия интенсивные конвективные потоки, хорошо заметные на теневых фотографиях.

Ключевые слова: лазерная плазма, ИПОР, рефракция лазерного излучения, лазерно-индуцированная конвекция.

1. Введение

В работе [1] обнаружен и исследован эффект поддержания плазмы в импульсно-периодическом оптическом разряде (ИПОР) в сфокусированном луче импульсно-периодического Yb^{3+} -лазера $\lambda = 1.07$ мкм при частоте повторения импульсов выше 2 кГц, длительности импульса излучения 200 мкс и импульсной мощности более 200 Вт в ксеноне при давлении $p = 10 \div 20$ бар. Характеристики плазмы ИПОР ближе к характеристикам непрерывного оптического разряда (НОР), чем оптического пробоя или лазерной искры [2, 3]. В нестационарной фазе развития ИПОР с момента начала очередного импульса в течение большого промежутка времени яркость плазмы и интенсивность спектральных линий ионов значительно превышают параметры НОР в аналогичных условиях [4], что свидетельствует о более высокой температуре плазмы в ИПОР. По окончании импульса плазма рекомбинирует с характерным временем $10 \div 20$ мкс, при этом интервал между импульсами, после которого еще возможно инициирование плазмы в очередном импульсе, составляет более

200 мкс. Через 200 мкс после окончания импульса в газе практически не остается свободных электронов и ионов. Первоначальное поглощение лазерного излучения в очередном импульсе возникает за счет переходов между возбужденными состояниями атомов ксенона благодаря сохраняющимся к началу очередного импульса возбужденным атомам.

Выбор параметров лазерных импульсов, с которыми проводились эксперименты с ИПОР [1], был обусловлен возможностями применявшегося лазера. Несмотря на то, что максимальная импульсная мощность лазера YRL QCW [5] корпорации IPG Photonics, с которым проводились эксперименты, достигает 1.5 кВт, в диапазоне частот повторения импульсов от 2 до 2.7 кГц, в котором наблюдался эффект самоинициирования ИПОР в каждом импульсе, максимально возможная импульсная мощность не превышала 350 Вт.

Специализированные импульсно-периодические лазеры серии ИЛИ (YLP) [6] НТО «ИРЭ-Полус» (подразделение IPG Photonics) при средней мощности 50 Вт обеспечивают импульсную мощность излучения до 6.5 кВт при длительности импульса на полувысоте $150 \div 170$ нс и частоте повторения импульсов 50 кГц и, что важно, очень высокой стабильности от импульса к импульсу на уровне долей процента. Длина волны излучения 1.06 мкм.

Несмотря на высокое качество излучения этих лазеров достижимая при различной степени фокусировки интенсивность излучения в диапазоне $10^9 \div 10^{10}$ Вт/см² примерно на порядок ниже величины, необходимой для лазерного пробоя на данной длине волны в чистых инертных газах при высоком давлении [3]. На практике при фокусировке излучения внутри кварцевой колбы с ксеноном под давлением $p = 8 \div 16$ бар с параметром фокусировки до $F = f/d < 4$, где d – диаметр луча на линзе, f – фокусное расстояние линзы (числовая апертура $NA > 0.125$) при высокой частоте повторения импульсов и энергии в импульсе, близкой к максимальной, лазерный пробой возникает, но не в каждом импульсе, и часто инициируется от частиц пылевой взвеси, образующейся при распылении электродов после искрового или дугового разряда. При подаче на электроды напряжения в несколько сотен вольт, убирающего пылевые частицы посредством возникающего при этом ионного ветра, пробой в данных условиях прекращаются.

В экспериментах с лазером YLP, в частности, благодаря строгой повторяемости характеристик от импульса к импульсу, в указанном предпробойном диапазоне интенсивности лазерного излучения авторами был реализован режим квазистационарного поддержания особого состояния разряда, который можно охарактеризовать как состояние предпробойной плазмы. По своим проявлениям эта плазма существенно отличается как от импульсно-периодического лазерного пробоя [7, 8], так и от ИПОР [1] и НОР [2, 4], т.е. можно говорить о самостоятельном явлении предпробойной плазмы или «тихой» лазерной искры.

«Тихая искра» не возникает в сфокусированном луче сама по себе, для ее появления требуется инициирование либо за счет случайной вспышки обычной лазерной искры на пылинке, либо за счет вспышки искрового или дугового разряда. «Тихая искра» не отличается сильным свечением, при дневном освещении нужно приглядываться, чтобы ее заметить, но она искажает проходящий через нее лазерный луч практически как НОР, а также создает в газе лазерно-индуцированные конвективные потоки, хорошо заметные на теневых изображениях области взаимодействия лазерного излучения с газом.

2. Экспериментальная установка

Несмотря на то, что по своей природе явление импульсно-периодического поддержания квазистационарной лазерной плазмы сходно с ИПОР с импульсами субмиллисекундной длительности [1], причиной существенных отличий ИПОР и «тихой искры» является применение в последнем случае мощных коротких лазерных импульсов. В экспериментах мощность в импульсе составляла до 6.5 кВт, форма импульсов была близка к треугольной при длительности по полувысоте 170 нс (форма импульсов показана на рис. 1).

Частота следования импульсов 50 кГц, энергия в импульсе до 1 мДж, длина волны $\lambda = 1.06$ мкм. По пространственным характеристикам излучение близко к основной попереч-

ной моде: $M^2 = 1.8$, ВРР = 0.5 мм·мрад, то есть при фокусировке с $F = f/d = 7$ диаметр луча в области фокуса был $d_0 \approx 20 \div 30$ мкм (неопределенность вносит, в частности, оптическая неоднородность кварцевой колбы лампы). При этом достигалась плотность мощности до 2×10^9 Вт/см², что допускало возможность пробоя (лазерной искры) при частоте повторения импульсов 50 кГц только при наличии центров инициирования (пыли). С более короткофокусной линзой при $F = 4.5$ достижимая плотность мощности возрастала до $(5 \div 7) \times 10^9$ Вт/см², при которой на частоте повторения 50 кГц обычная лазерная искра возникала в более широком диапазоне энергии импульсов, но в то же время сужался диапазон наблюдения «тихой искры».

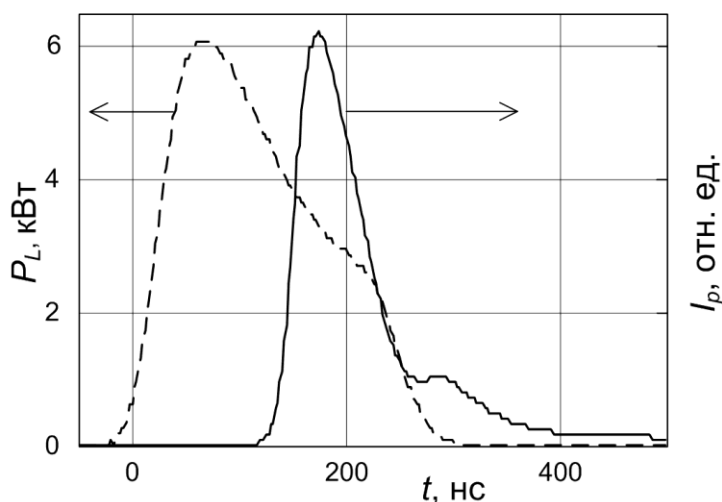


Рис. 1. Оциллограммы мощности лазерного импульса $P_L(t)$ (пунктирная линия) и интенсивности интегрального потока излучения $I_p(t)$ из области взаимодействия лазерного излучения с ксеноном при $p = 15 \pm 1$ бар, $F = 7$, $\tau_{FWHM} = 170$ нс, $f_r = 50$ кГц

В качестве кварцевых сосудов с ксеноном использовались стандартные дуговые ксеноновые лампы ДКсШ-50, -150 и ДКсЭл-1000 с давлением наполнения 15 бар, 14 бар и 8 бар соответственно. Во время работы с разрядом давление в лампе несколько возрастало за счет нагрева, причем тем сильнее, чем меньше была лампа. Луч диаметром 7 мм, выходящий из коллиматора лазера, фокусировался вблизи центра колбы с ксеноном с помощью линз с фокусным расстоянием $f = 30$ мм или $f = 50$ мм, что давало значение параметра фокусировки $F = f/d \approx 4.5$ и $F \approx 7$, или соответственно $NA \approx 0.11$ и $NA \approx 0.07$.

Электроды лампы использовались для инициирования разряда с помощью искры или кратковременного дугового разряда, кроме того на них могло подаваться высокое постоянное напряжение до 1.5 кВ, с помощью которого можно было удалять пыль и заряженные частицы из объема лампы.

На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки, позволяющей поддерживать квазистационарную «тихую искру» с помощью импульсно-периодического лазера, исследовать распределение интенсивности лазерного излучения, прошедшего через плазму, а также получать теневые изображения плазменного шнура и порождаемых им конвективных потоков. Для измерения распределения интенсивности в лазерном луче используется прибор Laserscope UFF-100 [9], а теневые изображения получают в расширенном луче неодимового лазера с диодной накачкой, работающего на длине волны 532 нм. Поскольку после прохождения кварцевой колбы луч приобретает сильный астигматизм, для повышения контрастности теневых изображений использовался горизонтальный или вертикальный нож Фуко, располагавшийся в соответствующей перетяжке луча за линзой, проецировавшей теневые изображения на экран для наблюдения в зависимости от преимущественной ориентации исследуемых неоднородностей в газе.

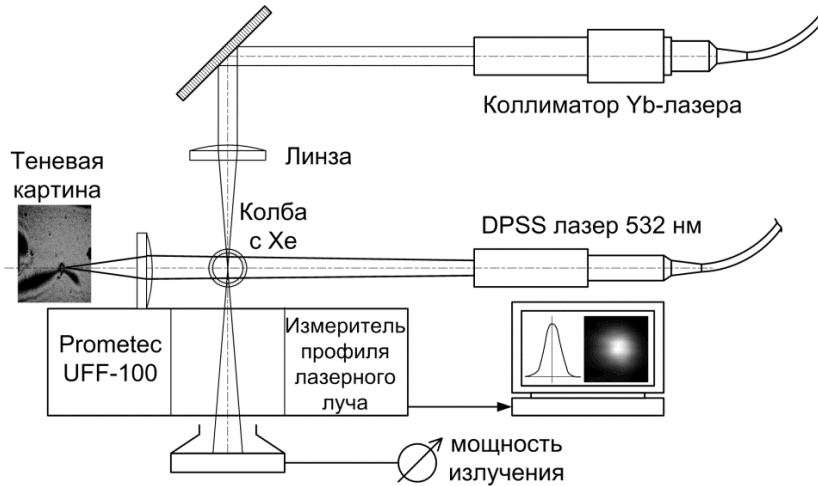


Рис. 2. Экспериментальная схема для исследования квазистационарного поддержания плазмы наносекундными повторяющимися импульсами допробойной интенсивности в Хе при давлении $p = 8 \div 16$ бар. Параметр фокусировки $F = 4 \div 7$ ($NA = 0.07 \div 0.12$), импульсная мощность лазера $P_L = 3 \div 6$ кВт, средняя мощность $P = 25 \div 50$ Вт, длительность импульса $\tau_{FWHM} = 170$ нс, частота повторения $f_r = 50 \div 100$ кГц

3. Результаты экспериментов

3.1. Внешний вид плазмы и условия наблюдения

При фокусировке импульсно-периодического излучения с длиной волны 1.06 мкм, частотой повторения 50 кГц в ксеноне под давлением от 8 до 16 бар в диапазоне плотности мощности от 10^9 до 5×10^9 Вт/см² и длительности импульса 170 нс в области фокуса после инициирования наблюдалось квазистационарное свечение в виде строго повторяющихся с частотой следования лазерных импульсов вспышек длительностью до 100 нс (см. рис. 1). Порог наблюдения явления составлял около 10^9 Вт/см² при давлении ксенона $14 \div 15$ бар и около 2×10^9 Вт/см² при давлении $8 \div 10$ бар.

Наблюдаемое явление, в отличие от лазерной искры (рис. 3), представляло собой относительно слабое и стабильное свечение газа в области фокуса без какой-либо нестационарности, характерной, например, для лазерной искры.

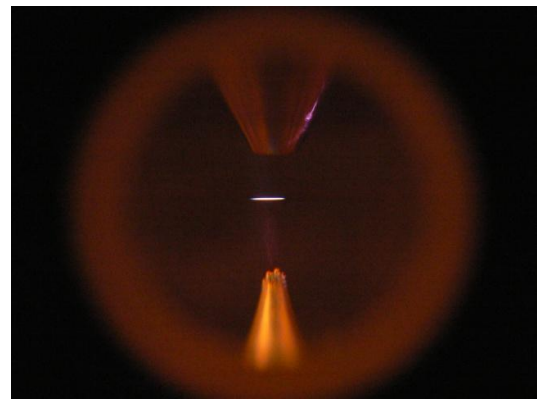
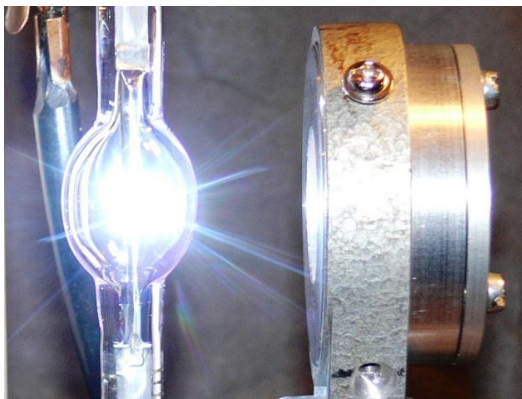


Рис. 3. Лазерная искра (слева) и наблюдаемая в области фокуса квазистационарная импульсно-периодическая зона свечения (справа). Различие в яркости составляет несколько порядков величины

Свечение было белого цвета, спектр в видимой области сплошной, без сильных линий, напоминающий рекомбинационный.

В зоне фокуса наблюдался значительный нагрев газа, приводивший к рефракции и искажению проходящего лазерного луча, а также к образованию лазерно-индуцированного конвективного потока в направлении поперек оси лазерного луча.

Среднее по времени поглощение лазерного излучения было невелико – менее 5%, на уровне погрешности измерения. Из осциллограммы лазерного излучения и излучения плазмы на рис. 1 видно, что заметное свечение плазмы, а значит и поглощение, появляется ближе к концу лазерного импульса. Слабость свечения плазмы, небольшое поглощение лазерного излучения, а также высокая стабильность отличают наблюдаемое явление от других типов импульсно-периодических оптических разрядов. Говорить о квазистационарности «тихой искры» позволяет наличие устойчивой картины искажения проходящего через область взаимодействия лазерного луча с газом, а также практически стационарные конвективные потоки, возникающие при этом взаимодействии.

Обычная лазерная искра (см. рис. 3) также наблюдалась в той же установке с тем же лазером при максимальной мощности лазерного излучения. Для реализации лазерной искры необходимо было тщательно настраивать фокусировку луча, используя короткофокусную линзу $F=4.5$ и пропуская лазерный луч через участок колбы с минимальными оптическими искажениями. В таких случаях удавалось наблюдать относительно регулярные вспышки лазерной искры, хотя лазерный пробой происходил не при каждом импульсе. Поскольку интенсивность, строго говоря, была меньше пробойной, в возникновении и развитии пробоя играли роль случайные факторы, такие как наличие пыли в колбе лампы, перенос пыли и активных частиц, ионов и возбужденных атомов внутри колбы нерегулярными потоками, создаваемыми ударными волнами, генерируемыми при вспышках лазерной искры. Свою роль в снижении порога пробоя играла и высокая частота повторения лазерных импульсов.

При возникновении искры наблюдалось значительное поглощение лазерного излучения, тогда как предпробойная плазма «тихой искры» сопровождалась, кроме свечения в области фокуса, только тепловой линзой, хорошо заметной по искажению проходящего лазерного луча, а также по теневой картине, наблюдавшейся в расширенном лазерном луче, перпендикулярном оси луча, поддерживавшего разряд.

Лазерный пробой в условиях экспериментов стабильно наблюдался при интенсивности лазерного излучения более 5×10^9 Вт/см² при давлении в кювете $p = 15$ бар. Отдельные вспышки лазерного пробоя наблюдались также при давлении $p = 8$ бар при более высокой интенсивности. Лазерная искра прекращалась, если к газовому промежутку прикладывалось электрическое поле с напряженностью порядка нескольких киловольт на сантиметр, удалявшее пыль и электрические заряды.

Тем не менее, именно случайные вспышки лазерного пробоя чаще всего приводили к инициированию квазистационарного свечения, которое затем стабильно поддерживалось при снижении плотности мощности вплоть до 10^9 Вт/см² при давлении $p = 14 \div 15$ бар.

На рис. 4 слева показан внешний вид наблюдавшегося свечения в области фокуса, показаны также границы луча, оптическая ось и положение фокуса. Распределение интенсивности свечения по изображению в относительных единицах с действительными линейными размерами показано на рис. 4 справа.

По осциллограммам лазерного импульса (см. рис. 1) и интегрального по спектру свечения плазмы, приведенного на рис. 4, можно заключить, что плазма представляет собой не успевший развиться по причине недостаточной интенсивности и длительности импульса лазерный пробой. Размер плазмы вдоль лазерного луча ~ 1 мм (рис. 4), диаметр светящегося канала по порядку величины соответствует диаметру лазерного луча в перетяжке, длительность импульса рекомбинационного излучения плазмы ~ 100 нс.

За время 20 микросекунд между импульсами электроны в рассматриваемом диапазоне давлений $8 \div 16$ бар успевают практически полностью рекомбинировать, и не могут быть ответственны за начальное поглощение лазерного излучения. Тем не менее, в зоне фокуса

от предыдущего импульса остается нагретый газ и некоторое количество атомов в электронно-возбужденном состоянии, которые могут за счет уширенных спектральных переходов $6s-6p$ ($5d-6p$, $6p-6d$) атома ксенона обеспечивать первоначальное поглощение излучения с длиной волны 1.06 мкм. Например, ближайшая достаточно сильная линия с центром $\lambda_c = 1.053$ мкм ($5p^5(2P_{3/2}^0)6p-5p^5(2P_{3/2}^0)6d$).

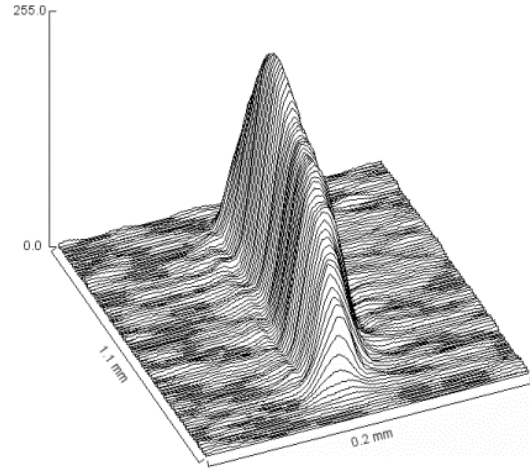
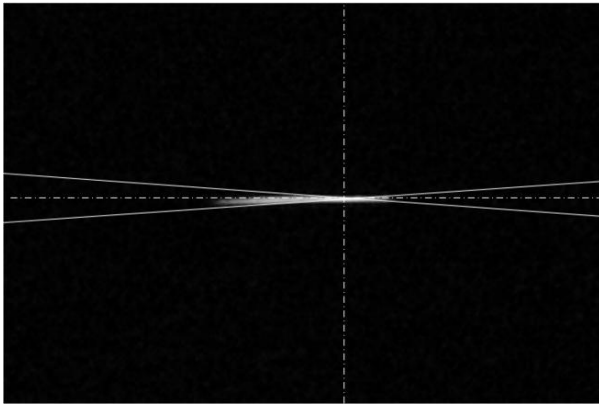


Рис. 4. Пространственные характеристики интегрального по времени свечения разряда. Линиями показаны оптическая ось, фокальная плоскость и границы лазерного луча. Длина плазмы 900 мкм, диаметр $30 \div 40$ мкм. Хе, $p = 15 \pm 1$ бар, $F = 7$, $P_L = 6$ кВт, $P = 50$ Вт, $\tau_{FWHM} = 170$ нс, $f_r = 50$ кГц

Оценка газовой температуры по наведенной тепловой линзе, характер свечения, высокая стабильность и повторяемость также указывают на возможность инициирования начального поглощения с участием метастабильных и резонансных уровней электронных состояний группы $5p^5 6s$.

Авторам не удалось попытка инициирования непрерывного оптического разряда от «тихой» искры, вероятно, по причине кратковременности ее яркой фазы и недостаточной вследствие этого средней концентрации электронов и электронно-возбужденных атомов для инициирования непрерывного разряда даже при достаточной мощности подводимого лазерного излучения.

3.2 Искажение лазерного излучения наведенной тепловой линзой

На рис. 5 показан результат измерения усредненных распределений интенсивности лазерного луча на расстоянии 39 мм позади фокальной плоскости линзы, показывающий, как меняется характер искажения лазерного луча в присутствии «тихой» лазерной искры в зависимости от средней и импульсной мощности излучения.

Видно, что при появлении и развитии свечения диаметр лазерного луча на расстоянии 39 мм от фокуса уменьшается примерно вдвое. Если к этим данным применить методику анализа наведенной отрицательной тепловой линзы, развитую в [10], согласно которой оптические характеристики газа в области свечения могут быть промоделированы в виде цилиндрического участка среды, в которой коэффициент преломления распределен по радиусу по параболическому закону с минимумом на оси и повышением к краю. Оценки по модели [10] показывают, что при длине области взаимодействия 1 мм и диаметре 0.1 мм наблюдаемое искажение пучка можно объяснить, если принять перепад коэффициента преломления между осью и краем цилиндрической области равным 0.004 , что соответствует разнице температур на оси и краю рассматриваемой области в ксеноне при $p = 15$ бар порядка $7 \div 10$ кК. Для этой оценки использовалась температурная зависимость коэффициента преломления ксенона при $p = 15$ бар, приведенная в работе [4].

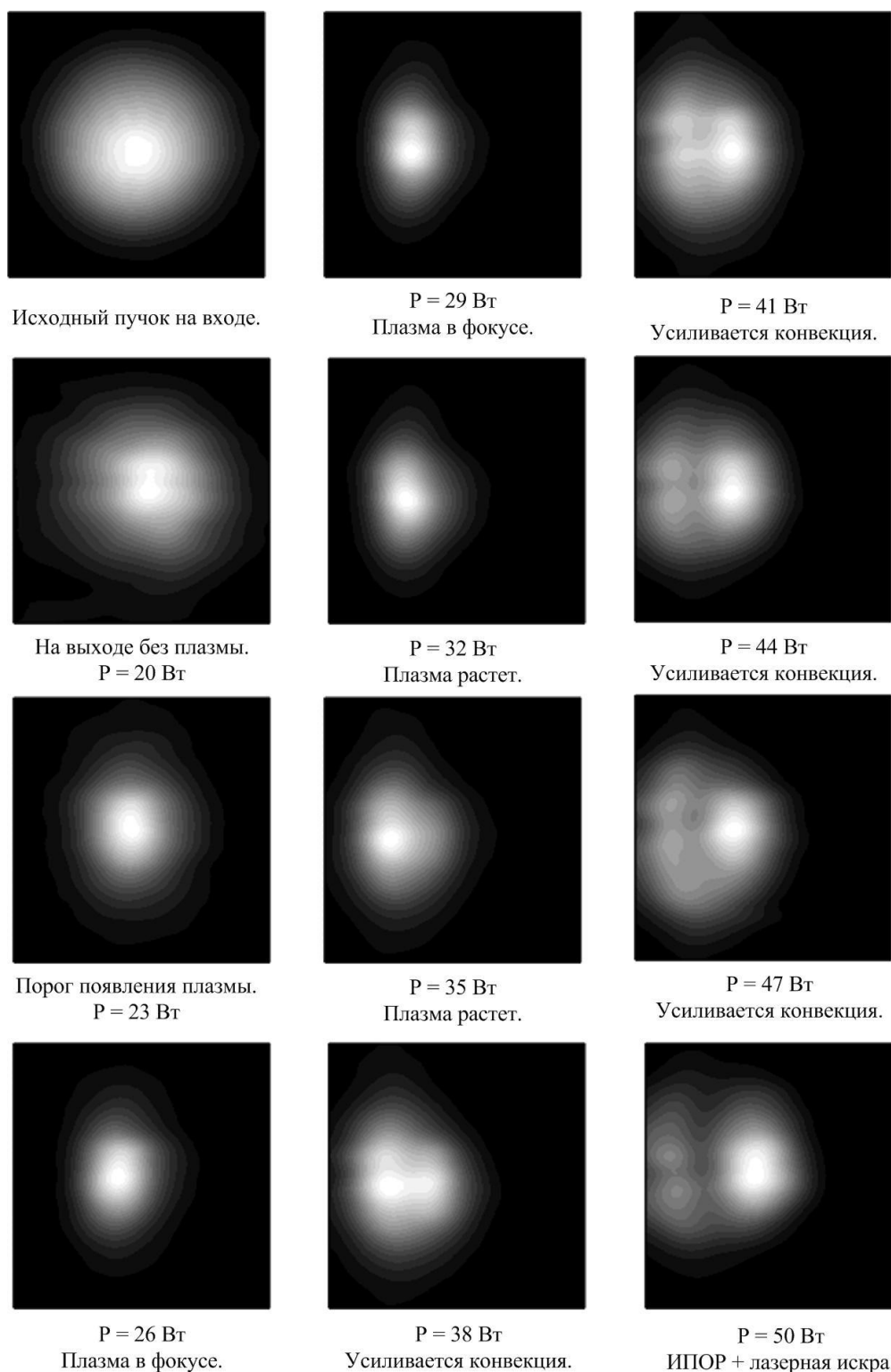


Рис. 5. Эволюция распределения интенсивности в луче лазера YLP после прохождения области взаимодействия при фокусировке $F=7$ внутри ксеноновой лампы ДКсШ-50 ($p \approx 16$ бар) в зависимости от средней мощности лазера P , $f_r = 50$ кГц. Расстояние от точки фокуса – 39 мм, размер кадра 6×6 мм². Ось симметрии не имеет выделенного направления. Вектор силы тяжести совпадает с направлением оптической оси

Оценка диаметра нагретой области 0.1 мм возникает из диаметра луча 30 мкм, совпадающего с областью начала нагрева, с учетом последующего расширения нагреваемого

газа за время импульса 170 нс со скоростью звука в ксеноне 240 м/с. За время импульса область нагретого газа успевает расшириться до диаметра около 100 мкм.

Оценка энергии, необходимой для нагрева холодного газа, первоначально находящегося в объеме перетяжки луча диаметром 30 мкм и длиной 1 мм до температуры 10 кК, дает величину ~ 40 мкДж, что составляет 4 % от энергии лазерного импульса и согласуется с наблюдаемым поглощением лазерного излучения в режиме «тихой искры».

3.3. Теневые изображения ИПОР

Анализ полученных распределений интенсивности в лазерном луче после прохождения зоны свечения (рис. 5), а также теневых изображений плазмы в режиме «тихой лазерной искры» (рис. 6, 7) показал, что начиная с определенной энергии в импульсе приблизительно $0.5 \div 0.6$ мДж наблюдаются изменения, которые могут быть интерпретированы как генерация квазистационарных конвективных потоков, вытекающих расширяющейся струей из области фокуса лазерного луча в преимущественном направлении перпендикулярно оптической оси. Это не гравитационная конвекция, поскольку направление потока в основном перпендикулярно оптической оси независимо от ориентации лазерного луча и лампы относительно направления силы тяжести.

На рис. 6 показана типичная теневая картина, показывающая наблюдаемый конвективный поток, отнесенная к картине свечения. Видно, что поток вытекает из зоны, примерно соответствующей середине области свечения, а также вытянутой вдоль оптической оси области на теневой картине, обозначающей границы зоны тепловыделения.

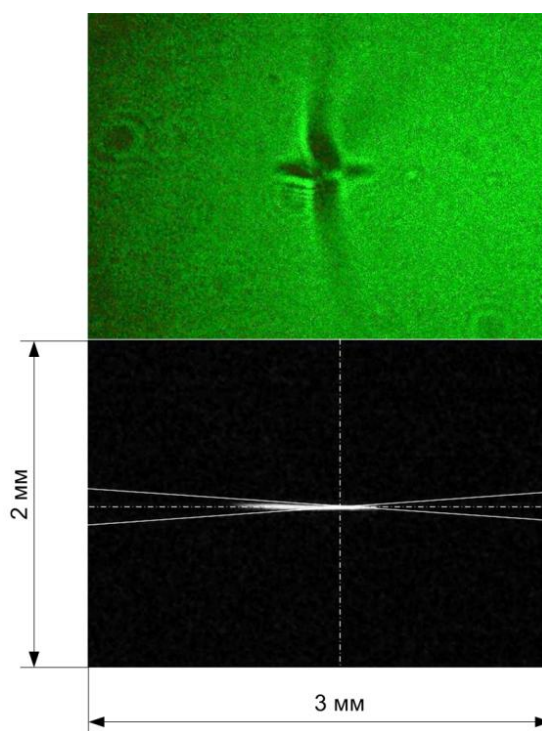


Рис. 6. Теневое изображение плазмы и сопутствующих конвективных потоков (вверху) и соответствующее изображение свечения плазмы с линиями, показывающими ход луча в области фокуса ($F=7$). Излучение падает слева направо

Картина конвективного течения не является строго стационарной и не является совершенно симметричной. Представление об эволюциях течения можно получить из рис. 7, на котором представлен ряд последовательных теневых снимков области разряда, сделанных с интервалом 1 с.

Струи нагретого газа, видимые на теневых фотографиях в виде темных полос по обе или по одну сторону от оптической оси лазерного луча, не вытекают из центра разряда равномерно во все стороны и перпендикулярно или с некоторым небольшим отклонением от перпендикуляра к оптической оси, как можно было бы заключить из некоторых снимков. Периодически поток поворачивается так, что он виден текущим в одну сторону, в частности, на рис. 7 преимущественно вниз. Это направление также не имеет связи с направлением силы тяжести, поскольку поведение потока при вертикальном расположении оптической оси совершенно аналогично.

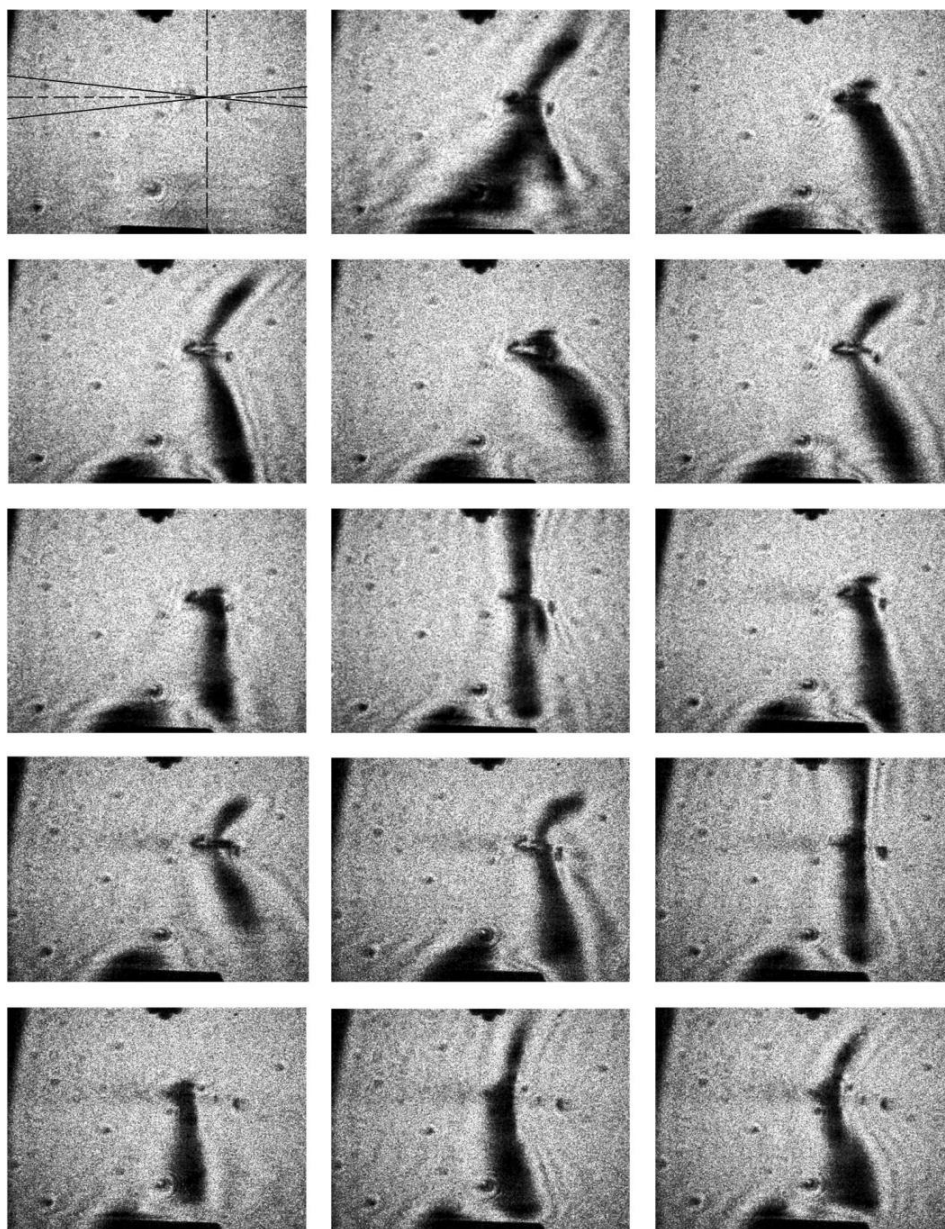


Рис. 7. Последовательные теневые изображения области вокруг зоны взаимодействия, снятые с интервалом 1 с, показывающие временную эволюцию конвективных потоков. Размер кадра $3.2 \times 2.4 \text{ мм}^2$. На первом кадре плазма отсутствует, линиями показан ход лучей, оптическая ось и положение фокуса. Лазерное излучение падает слева направо. Сверху и снизу вблизи центра видны концы электродов лампы ДКсШ-150, межэлектродное расстояние 2.2 мм. Давление ксенона $p \approx 15$ бар. Направление вектора силы тяжести в данном эксперименте снизу вверх

Поскольку направление силы тяжести практически не сказывается на картине конвективного потока, можно сделать заключение, что его скорость значительно превышает скорость гравитационной конвекции газа, нагретого до той же температуры.

На рис. 5 с появлением сильных конвективных потоков связано изменение характера искажения проходящего луча, начиная со средней мощности излучения $P \approx 35$ Вт (энергия в импульсе 0.6 мДж). В частности, появление выделенной оси на распределении интенсивности лазерного излучения, вдоль которой преимущественно происходит дальнейшее расширение и расщепление лазерного луча после прохождения зоны взаимодействия, появляется одновременно с формированием конвективного потока и в направлении, соответствующем преимущественному направлению конвекции. Само по себе возникновение выделенного направления конвекции, судя по всему, обусловлено случайными факторами, например, расположением зоны взаимодействия лазерного луча с газом относительно электродов и стенок внутри кварцевой колбы.

Газодинамика формирующегося в фазе «тихой искры» конвективного потока, в частности, препятствовала одновременному с «тихой искрой» горению стационарных разрядов, таких как дуговой разряд или непрерывный оптический разряд. В тех экспериментах, когда авторы пытались воздействовать на стационарные разряды излучением мощных коротких импульсов лазера YLP с целью локального повышения температуры и оптической яркости плазмы дугового или непрерывного оптического разряда, порождаемый импульсно-периодическим разрядом типа «тихой искры» конвективный поток локально нарушал стабильность плазмы стационарных разрядов, а при попытке увеличения энергии лазерных импульсов вызывал колебания плазмы вплоть до ее погасания.

4. Обсуждение результатов

При нагреве газа до температуры порядка нескольких тысяч градусов его плотность в области фокуса падает в десять и больше раз. Этим, в частности, обусловлена сильная рефракция лазерного луча. По окончании лазерного импульса газ быстро остывает за счет рекомбинации электронов и излучения, давление резко падает, и в газе образуется что-то вроде протяженной полости. Под действием окружающего плотного газа полость схлопывается за время порядка нескольких микросекунд (со скоростью звука), порождая при этом, судя по наблюдаемым последствиям, направленные от концов полости к ее середине встречные потоки. Сталкиваясь, эти потоки образуют расходящийся в стороны перпендикулярно оптической оси конвективный поток, который наблюдается на теневых фотографиях. Повторяясь с частотой следования лазерных импульсов 50 кГц, этот процесс постоянно подпитывает конвективный поток, делая его квазистационарным. Этот эффект нельзя спутать с гравитационной конвекцией, поскольку направление потока не было связано с направлением вектора силы тяжести, только с направлением оптической оси, кроме того наблюдаемые потоки выглядят на порядок интенсивнее обычной гравитационной конвекции.

На рис. 8 схематически показана возможная последовательность формирования конвективного потока. Сразу после импульса энерговыделения вследствие нагрева газа, его резкого расширения и последующего быстрого остывания плазмы в газе может образоваться вытянутая веретенообразная «полость» – область пониженного давления длиной около 1 мм. Далее полость начинает «схлопываться» с скоростью порядка скорости звука в ксеноне – около 240 м/с. Таким образом характерное время «схлопывания» $\sim 10^{-3}/240 \sim 4$ мкс.

При схлопывании веретенообразной полости от концов к середине образуются два направленных навстречу друг другу газовых потока, которые, сталкиваясь вблизи фокальной плоскости, формируют растекающийся в стороны перпендикулярно оптической оси результирующий поток, который и наблюдается на теневых картинках. Длительность импульса нагрева газа соответствует времени свечения – порядка 100 нс. Интервал между импульсами – 20 мкс. При повторяющихся импульсах периодическое образование и схлопывание полости порождает пульсирующее течение газа, наблюдаемое на теневых картинках как

непрерывный конвективный поток. Скорость конвективного потока значительно больше скорости гравитационной конвекции, предпочтительное направление случайно и не зависит от направления гравитационных сил.

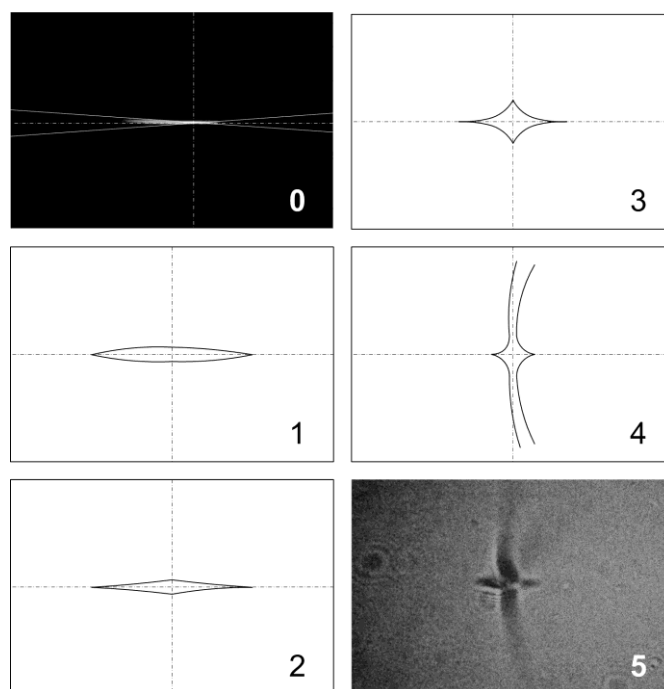


Рис. 8. Предполагаемая последовательность релаксации области импульсного энерговыделения (0) с формированием зоны пониженного давления (1) и ее гидродинамическим сжатием (2, 3), приводящим к образованию конвективного потока (4, 5) по окончании очередного импульса. Хе, $p \approx 15$ бар

5. Заключение и выводы

Экспериментально обнаружено явление поддержания стабильного светящегося плазменного шнура в ксеноне высокого давления под действием импульсно-периодического лазерного излучения с интенсивностью ниже порога лазерного пробоя газа.

От известного явления лазерного пробоя или лазерной искры наблюдаемое явление отличается относительно небольшим поглощением лазерного излучения, стабильностью, стационарностью и строгой повторяемостью с частотой повторения лазерных импульсов. Порог поддержания такой импульсно-периодической плазмы, которую можно назвать предпробойной, примерно на порядок ниже порога лазерного пробоя.

Наблюдаемое значительное искажение лазерного луча после прохождения зоны разряда может свидетельствовать о нагреве газа в области взаимодействия с излучением до температуры $7 \div 10$ кК, способной обеспечить высокие градиенты плотности газа и коэффициента преломления лазерного излучения в зоне прохождения лазерного луча.

О высоком нагреве газа при прохождении лазерного импульса свидетельствует и наблюдаемый на теневых фотографиях лазерно-индуцированный газовый поток из зоны разряда, направленный в основном перпендикулярно оптической оси. Это не гравитационная конвекция, поскольку направление потока не связано с направлением вектора силы тяжести, а скорость газа значительно превышает скорость гравитационной конвекции.

В качестве объяснения наблюдаемого свето-газодинамического эффекта предлагается механизм схлопывания быстро остывающей после окончания лазерного импульса протяженной вдоль оптической оси зоны разряда, при котором геометрия разряда порождает направленные навстречу друг другу газовые струи, которые, сталкиваясь, образуют растекающийся в стороны от оптической оси поток газа, наблюдаемый в экспериментах.

Благодарности

Авторы выражают свою глубокую признательность ООО НТО «ИРЭ-Полус» за помощь в проведении исследований, а также И.Г. Рудому и А.М. Сороке за полезные обсуждения.

Литература

1. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Поддержание плазмы в ксеноне импульсно-периодическим лазерным излучением // Физика плазмы, 2015, Т. 41, № 10, С. 929–932.
2. Райзер Ю.П. Оптические разряды // УФН, 1980, Т. 132, Вып. 3, С. 549–581.
3. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 307 с.
4. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Оптические разряды, поддерживаемые излучением лазеров ближнего ИК-диапазона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 5.
<http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/247/>
5. IPG Photonics Corp.: QCW Single-mode Ytterbium Fiber Lasers // http://www.ipgphotonics.com/QCW_sm.htm
6. ООО НТО «ИРЭ-Полус»: Импульсные иттербиевые лазеры // http://www.ntoire-polus.ru/products_low_ili.html
7. Uhlenbusch J., Viol W. H_{β} -line profile measurements in optical discharges // J. Quant.Spectroscopy and Radiation Transfer, 1990, Vol. 44, Pp. 47–56.
8. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. Стабилизация оптического разряда в сверхзвуковом потоке аргона // Доклады академии наук, 1994, Т. 336, № 4, С. 466–467.
9. Prometec GmbH: Laserscope UFF-100 // http://www.prometec.com/download/datasheets_laser/UFF100_GB.pdf
10. Zimakov V.P., Kedrov A.Yu., Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu. Laser sustained plasma ball lensing effect controlled by means of coaxial gas flow // Proc. SPIE, 2011, Vol. 7913, P. 791305.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2015 г.