

Научная статья

УДК 533.95

DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-48-58

Влияние электрического поля на оптический разряд в воздушном потоке

Владимир Николаевич Зудов¹
Андрей Викторович Тупикин²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ zudov@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5043-9263>

² tupikin@itp.nsc.ru

Аннотация

Получены экспериментальные данные о влиянии электрического поля на плазму оптического разряда, находящегося в воздушном потоке. Рассмотрены две конфигурации внешнего электрического поля при воздействии на плазму оптического разряда. Для создания электрического поля применялись плоские (поле вдоль луча и поперек потока) и кольцевые (поле поперек лазерного луча и вдоль потока) электроды. Установлено, что существует два режима комбинированного разряда (оптического и электрического). При создании поля симметрично относительно оси потока наблюдался электрический пробой от среза сопла (положительно заряженный электрод) до точки фокусировки лазерного луча, при этом в следе оптического разряда стримеров не наблюдается. В другом случае электрический разряд реализуется между плоскими электродами одновременно с оптическим пробоем. В поле постоянной напряженности выше 3 кВ/см наличие плазмы оптического разряда способствовало электрическому пробоем среды. При этом параметры электрического пробоя зависели от формы электродов, полярности приложенного напряжения и скорости воздушного потока.

Ключевые слова

экспериментальное моделирование, лазерное излучение, оптический пробой, электрическое поле, электрический разряд, воздушный поток

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500157-3) и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00304)

Для цитирования

Зудов В. Н., Тупикин А. В. Влияние электрического поля на оптический разряд в воздушном потоке // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 2. С. 48–58. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-48-58

© Зудов В. Н., Тупикин А. В., 2021

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2021. Том 16, № 2. С. 48–58

Siberian Journal of Physics, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 48–58

Effect of an Electric Field on an Optical Breakdown in the Air Stream

Vladimir N. Zudov¹, Andrey V. Tupikin²

¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

² Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ zudov@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5043-9263>
² tupikin@itp.nsc.ru

Abstract

Experimental data on the effect of an electric field on the plasma of an optical discharge in an air flow have been obtained. Two configurations of an external electric field under the action of an optical discharge on the plasma are considered. To create an electric field, flat (the field along the beam and across the flow) and ring electrodes (the field across the laser beam and along the flow) were used. It was found that there are two modes of combined discharge (optical and electrical). When the field was created symmetrically with respect to the flow axis, an electrical breakdown was observed from the nozzle exit (positively charged electrode) to the focusing point of the laser beam, while no streamers were observed in the optical discharge wake. In another case, an electric discharge is realized between flat electrodes simultaneously with optical breakdown. In a field of constant strength above 3 kV/cm, the presence of an optical discharge plasma promoted electrical breakdown of the medium. In this case, the parameters of the electrical breakdown depended on the shape of the electrodes, the polarity of the applied voltage, and the air flow rate.

Keywords

experimental simulation, laser radiation, optical discharge, electric field, electrical discharge, air stream

Funding

This work was carried out within the framework of a state assignment (state registration no. 121030500157-3) and with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-08-00304)

For citation

Zudov V. N., Tupikin A. V. Effect of an Electric Field on an Optical Breakdown in the Air Stream. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 48–58. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-48-58

Введение

Управление горением с использованием внешнего энергоподвода – одно из активно развивающихся направлений научных исследований. Это связано с поиском способов инициирования и стабилизации горения в высокоскоростных камерах сгорания. Для решения возникающих проблем используются электрические разряды различных типов (тлеющие, дуговые, микроволновые, барьерные и др.), лазерное излучение, в том числе оптический пробой [1].

Принципиальная возможность инициирования горения с использованием оптического разряда в сверхзвуковых и трансзвуковых каналах показана в [1–4]. Для стабилизации пламени требуются параметры лазерного излучения, обеспечивающие квазистационарный режим взаимодействия оптического разряда с потоком. В [3; 4] частота и мощность лазерного излучения были недостаточны для реализации квазистационарного режима, т. е. необходимо увеличивать либо частоту следования импульсов при сохранении их интенсивности, либо размер плазменного образования. Первое условие выполнить практически невозможно технически для современного уровня развития лазеров, второе может быть достигнуто путем воздействия на плазму оптического разряда электрическим полем. Один из вариантов – создание ситуации, в которой при наличии лазерного излучения электрический пробой среды произойдет при низкой напряженности поля, ниже порога пробоя среды.

Для реализации в технических приложениях описанных выше принципов управления горением необходимо всестороннее понимание физических механизмов, управляющих распро-

странением интенсивных лазерных импульсов в воздухе, и понимание физических явлений при эволюции плазменных каналов в таких условиях. В предлагаемой работе изучалась возможность совместного существования электрического пробоя в воздушном потоке и оптического разряда, сформированного сфокусированным лазерным излучением.

В дальнейшем процесс совместного существования электрического пробоя и оптического разряда может быть использован для того, чтобы вызвать воспламенение и горение высокоскоростного потока топливовоздушной смеси в диапазоне давлений.

Когда интенсивное лазерное излучение фокусируется в атмосфере, воздух ионизируется из-за многофотонной или туннельной ионизации, и образуются один или несколько плазменных каналов с низкой проводимостью [5]. Особенности филаментации лазерного луча, такие как распространение на большие расстояния [6–9] и пробой в воздухе [10], привели к множеству потенциальных технологических и научных приложений. Лазерная плазма использовалась в качестве источников терагерцового и рентгеновского излучения для спектроскопических и медицинских приложений [11]. Также были разработаны чувствительные методы измерения ультрафиолетового излучения с использованием оптического пробоя газа [12–14].

Реализация совместного оптического и электрического разрядов также находит применение в различных областях научных и технических приложений. В [15–21] комбинация электрического поля с лазерным пробоем применялась для формирования лазерного триггерного переключателя искрового разрядника. Такая схема основана на том, что напряжение пробоя разряда между электродами может быть снижено путем формирования плазмы лазерного пробоя в пространстве [15]. Кроме того, в [22] показано, что за счет создания индуцированного лазером электрического пробоя длину стримеров можно значительно увеличить. Это может быть использовано для снижения пороговых характеристик зажигания и горения легковоспламеняющейся смеси [20]. В эксперименте [21] для создания плазмы излучение CO₂-лазера фокусировалось в воздухе низкого давления (давление порядка 20 Торр). Было получено, что образование лазерного пробоя подавляется приложенным внешним электрическим полем. Заметим, что без приложения электрического поля оптический пробой реализовывался практически со 100 % вероятностью. При увеличении электрического поля свыше 600 В/см пробой в значительной степени мог быть подавлен (частота пробоя падала). Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля вело к прежнему состоянию оптического разряда. Иначе говоря, существует экстремум по параметрам электрического поля при реализации в нем оптического разряда.

Основной сформировавшейся и развитой теорией оптического пробоя является механизм электронной лавины [5]. Развитие электронной лавины определяется в первую очередь скоростью нарастания энергии электрона в процессе поглощения и вынужденного испускания квантов при столкновении с атомами. В отсутствие внешних полей процессом, ответственным за потери электронов, как правило, считают диффузию, которая при низких давлениях может быть значительной. Наложение внешнего поля на область фокусировки увеличивает отток электронов, повышая порог оптического пробоя. При определенной напряженности поле само начинает способствовать рождению свободных электронов, тем самым обеспечивая комфортные условия для развития области поглощения лазерного излучения, что может служить объяснением существования экстремума по параметрам электрического поля при реализации в нем оптического разряда.

В [22] при атмосферном давлении было показано изменение порога пробоя путем наложения электрического поля на область фокусировки лазера Nd: YAG (длиной волны 1 064 нм) в наносекундном временном масштабе, т. е. происходило увеличение пороговой интенсивности излучения при пробое среды. В зависимости пороговой интенсивности от напряженности внешнего электрического поля экстремума не наблюдалось. Аналогично, в работе [23] приложение внешнего электрического поля к фокусному объему газовой ячейки высокого давления вело к увеличению порога оптического пробоя. Авторы считают, что это связано

с электростатической очисткой газа (от частиц, являющихся очагами пробоя) и за счет удаления свободных электронов из области фокусировки между лазерными импульсами. В экспериментах с длиной волны лазерного излучения 1,06 нм при длительности 200 пс и интервалом между импульсами 7,5 нс было установлено, что электростатическая очистка эффективно гасит оптический пробой в условиях 20 атм. при максимальной интенсивности единичного импульса 140 Дж/см^2 ($\sim 0,7 \text{ ТВт/см}^2$). При этом воздействие внешним электрическим полем на фокальный объем создает дополнительный механизм потерь (дрейф), который помогает снизить плотность свободных электронов ниже пороговой, которая требуется для инициирования оптического пробоя.

Таким образом, в работах [22; 23] не наблюдалось экстремума по параметрам электрического поля при реализации в нем оптического разряда. Возможно, причина в том, что эти эксперименты были проведены при давлениях, существенно превышающих давление в [21].

Заметим, что наличие зависимости пороговой интенсивности лазерного излучения при осуществлении оптического разряда от давления среды экспериментально представлено в [19], где наблюдался экстремум в зависимости интенсивности излучения плазмы от давления для неона и аргона.

В предлагаемой работе наблюдались описанные выше явления, связанные с затуханием оптического разряда. Особое внимание уделялось возможности создания плазменного образования с геометрическими размерами, превышающими размеры оптического разряда. Для этого экспериментально была реализована комбинация из оптического и электрического разрядов. Воздействие на плазму осуществлялось стационарным электрическим полем напряженностью до 3 кВ/см и выше.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена экспериментальная установка для исследования влияния электрического поля на лазерный пробой. Эксперименты проводились при истечении воздушной струи в свободную атмосферу.

В опытах применялись различные конфигурации электродов: плоские электроды – электрическое поле вдоль лазерного луча и поперек воздушного потока (рис. 1, а); кольцевые электроды – поле вдоль потока и поперек луча (рис. 1, б). Была опробована также конфигурация, подобная представленной на рис. 1, а, но вместо плоских пластин устанавливались кольцевые электроды.

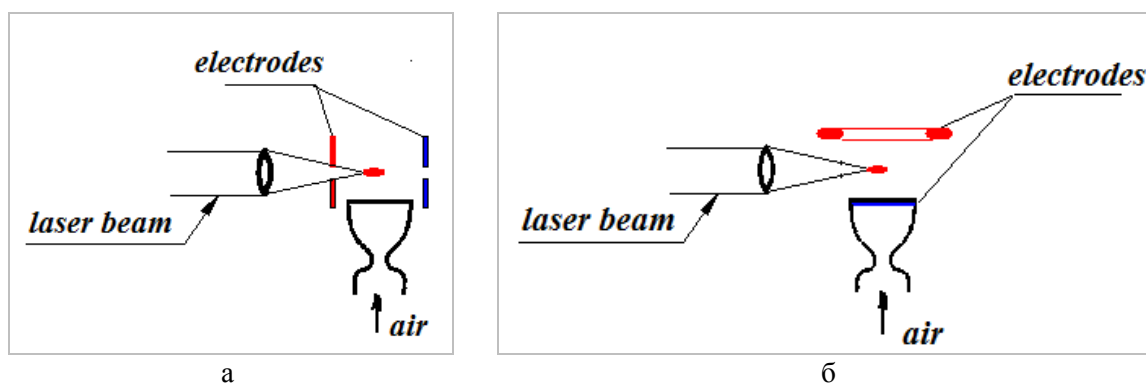


Рис. 1. Электрическая схема:

а – электрическое поле вдоль луча; б – электрическое поле поперек луча

Fig. 1. Electrical circuit:

a – electric field along the beam; b – field across the beam

В случае плоскопараллельных пластин расстояние между ними было 3 см. В электродах имелись отверстия диаметром 5 мм для лазерного луча, фокусируемого на оси воздушного потока. Пластины располагались вне границы истекающей струи. В ходе опытов полярность электродов могла меняться. Для создания плазмы оптического пульсирующего разряда применялся электроразрядный CO_2 -лазер ЛОК-3СГУ (разработка Института лазерной физики СО РАН), который обеспечивал импульсно-периодический режим работы с частотой следования импульсов до 60 кГц при средней мощности порядка 1,0 кВт. В экспериментах лазер работал в пакетном режиме: частота импульсов в пакете 30 кГц, длина пакета 6–7 импульсов, частота следования пакетов 5 кГц. Излучение CO_2 -лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой из ZnSe между электродами на оси струи, на заданном расстоянии от среза сопла. В ходе эксперимента применялись линзы с различным фокусным расстоянием ($f = 63$ или 95 мм). На рис. 2. представлена схема эксперимента.

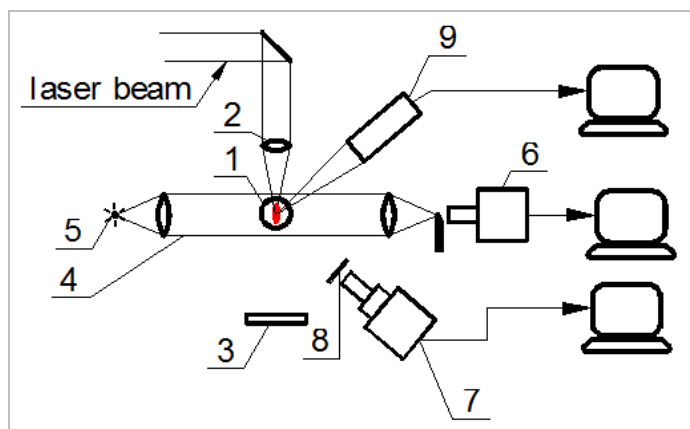


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – объект наблюдения; 2 – линзы; 3 – поглотитель; 4 – шлирен система; 5 – источник света; 6 – фотокамера; 7 – высокоскоростная камера; 8 – интерференционный фильтр; 9 – CCD-камера
Fig. 2. Scheme of the experiment: 1 – the object of observation; 2 – lenses; 3 – absorber; 4 – schlieren system; 5 – light source; 6 – camera; 7 – high-speed camera; 8 – interference filter; 9 – CCD camera

Расстояние от среза сопла до точки фокусировки луча в ходе экспериментов варьировалось. Воздушная смесь, подаваемая в форкамеру, проходила через систему измерения расхода и истекала из сопла в затопленное пространство. Внутренний диаметр форкамеры 80 мм, длина 95 мм. Для формирования потока использовалось коническое сопло с угловой точкой. Диаметры критического и выходного сечений равны 15,5 и 20 мм соответственно. Расстояние между указанными сечениями 25 мм. Максимальное давление в форкамере 0,8 МПа, температура 290 К.

Для регистрации структуры теплового следа от пробоя применялась теньевая схема со щелью и плоским ножом, в качестве источника подсветки использовался искровой источник с длительностью свечения 1 мкс. Это позволило проследить развитие теплового следа от сфокусированного лазерного излучения.

В опытах размеры плазменной области составляли 5–7 мм, за ней формировался периодический тепловой след. На снимках можно было наблюдать следующие структуры: плазмод (область энергоподвода при поглощении лазерного излучения); ударные волны, исходящие из области энергоподвода, и тепловые неоднородности, смещающиеся по потоку и формирующие периодическую структуру теплового следа.

На рис. 3 представлен пример теневой регистрации при оптическом пробое в отсутствие электрического поля: *a* – в покоящейся среде, *b* – в сверхзвуковой струе. На рис. 3, *a* хорошо

видна ударная волна, распространяющаяся из области энергоподвода по покоящейся среде. Вначале ударная волна повторяет форму плазменного образования, а затем принимает форму окружности. На рис. 3, б видим структуру сверхзвуковой струи при нерасчетном истечении в атмосферу, область фокусировки находится выше конического скачка уплотнения формирующегося при нерасчетном истечении сверхзвуковой струи. Была выявлена внутренняя структура сверхзвуковой затопленной струи, состоящая из скачков уплотнения, плазмоида, тепловых неоднородностей в следе за ним. В пространстве за границей струи наблюдаются периодические звуковые возмущения, частота которых соответствует частоте следования лазерных импульсов, рис. 3, б.

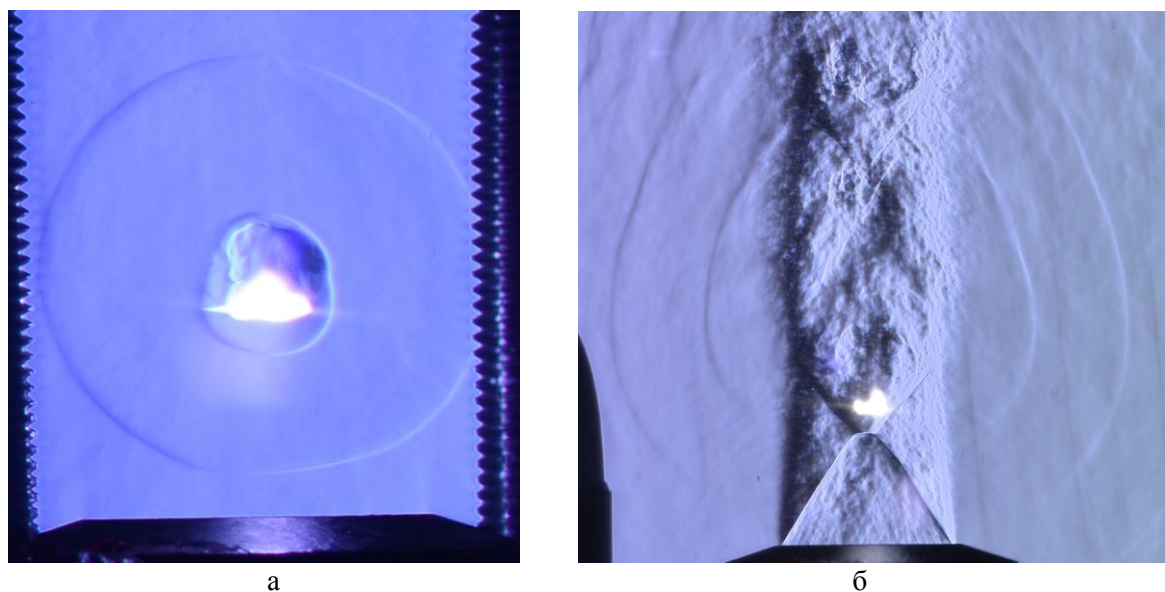


Рис. 3. Теневая регистрация оптического разряда в отсутствие электрического поля:
a – без потока; *б* – в сверхзвуковом потоке ($P_0 = 0,3$ МПа)
 Fig. 3. Shadow registration of an optical discharge in the absence of an electric field:
a – without a flux; *b* – in a supersonic flow ($P_0 = 0.3$ МПа)

На рис. 4 представлен пример теневой регистрации в случае плоских электродов для напряженности поля менее 3 кВ/см. Отчетливо видны плазмод, ударные волны и тепловые неоднородности. Значимого влияния электрического поля на структуру течения не наблюдается.

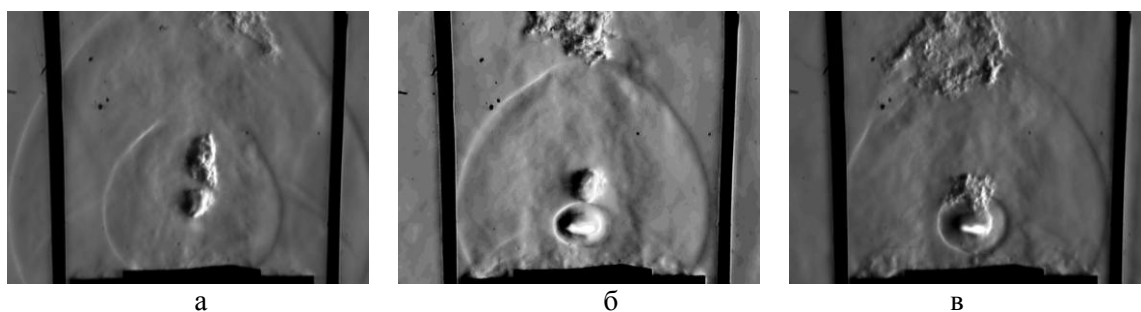


Рис. 4. Теневая регистрация для случая плоских электродов в дозвуковом потоке:
a – в отсутствие электрического поля; *б* – поле направлено слева на право; *в* – поле направлено справа налево
 Fig. 4. Shadow registration for the case of flat electrodes in a subsonic flow:
a – in the absence of an electric field; *b* – the field is directed from left to right and *c* – from right to left

В дозвуковом потоке при низкой напряженности электрического поля вне зависимости от полярности наблюдалось снижение вероятности существования оптического пробоя. При наложении поля уменьшалась количество откликов образующейся плазмы оптического разряда. Очевидно, реализуется ситуация, аналогичная представленной в работе [23], т. е., вероятно, происходит электростатическая очистка области фокусировки от посторонних частиц, являющихся центрами развития пробоя. Можно также предположить, что снижение частоты пробоя связано и с увеличением оттока электронов из области фокусировки под воздействием электрического поля.

Схожая ситуация наблюдается и для кольцевых электродов в отсутствие электрического пробоя (рис. 5, *а, б*). Увеличение напряженности электрического поля в такой конфигурации электродов ведет к реализации комбинированного оптического и электрического разряда.

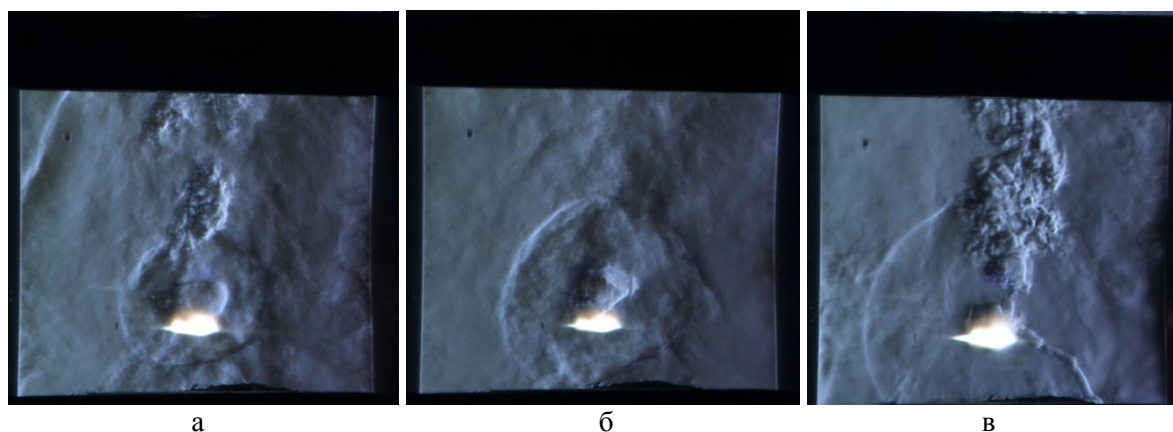


Рис. 5. Теневая регистрация для случая кольцевых электродов (анод сверху) в дозвуковом потоке: *а* – в отсутствие электрического поля; *б* – слабое поле ($E < 3$ кВ/см); *в* – сильное поле ($E > 3$ кВ/см)
Fig. 5. Shadow registration for the case of annular electrodes (anode on top) in a subsonic flow: *a* – in the absence of an electric field; *b* – weak field ($E < 3$ kV/cm) and *c* – strong field ($E > 3$ kV/cm)

На рис. 5 в отчетливо виден стример от нижнего электрода к области оптического пробоя. Отметим, что выше плазменного образования, т. е. в следе оптического разряда, стримерных каналов не наблюдается. Совместное существование оптического и электрического разрядов ведет к дополнительному энергетическому воздействию на структуру течения и тем самым может улучшить условия для инициирования горения и стабилизации топливных смесей в скоростном потоке.

Комбинированный разряд был получен и в конфигурации с полем, направленным вдоль лазерного луча. В этом случае плоские пластины были заменены на кольцевые электроды. Воздушная струя истекала в затопленное пространство со сверхзвуковой скоростью (расчетное число Маха $M = 2$). Структура сверхзвуковой струи с оптическим и комбинированным разрядами при одинаковых условиях истечения представлена на рис. 6. Стримеры электрического разряда создают дополнительное тепловыделение, о чем свидетельствуют тепловые неоднородности плотности за апертурой струи (см. рис. 6, *б*). Следовательно, комбинированный разряд создает область теплоподвода, значительно превышающую размеры оптического пробоя. Режим взаимодействия такого плазменного образования со струей приближается к квазистационарному, что необходимо для инициирования и стабилизации горения в высокоскоростном потоке топливовоздушной смеси.

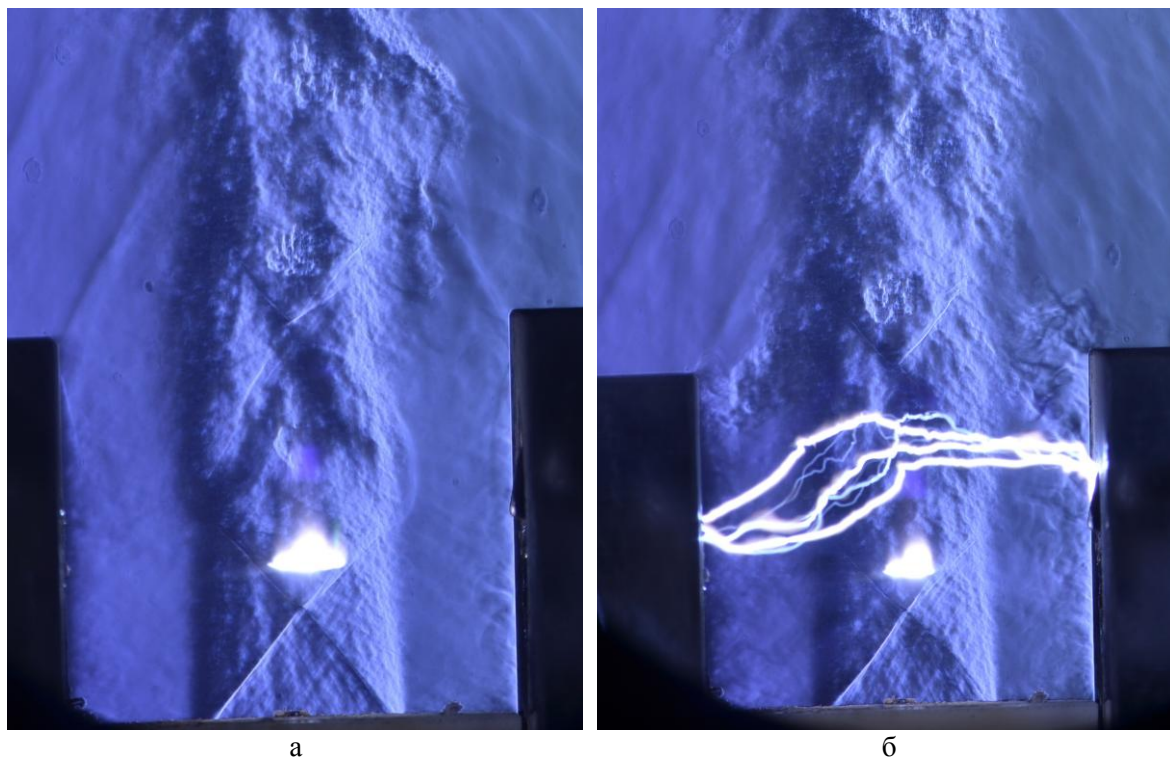


Рис. 6. Теневая регистрация для случая кольцевых электродов в сверхзвуковом потоке $P_0 = 0,5$ МПа:

a – без электрического разряда; *б* – с электрическим разрядом ($V = 22$ кВ)

Fig. 6. Shadow registration for the case of ring electrodes in a supersonic flow $P_0 = 0.5$ MPa:

a – without an electric discharge; *b* – with an electric discharge ($V = 22$ kV)

Таким образом, с помощью электрического поля можно осуществлять управление плазмой оптического разряда. Наблюдается снижение вероятности оптического пробоя при наличии поля вне зависимости от конфигурации силовых линий и полярности прикладываемого напряжения. При напряженности поля свыше 3 кВ/см наличие плазмы оптического разряда приводило к возникновению электрического пробоя. Форма и предельные характеристики электрического пробоя зависят от конфигурации электродов, полярности прикладываемого напряжения и скорости воздушного потока. В случае направления поля по потоку наблюдался пробой от сопла (нижний электрод, земля) до места фокусировки лазерного луча, выше по потоку от плазмы оптического пробоя стримеры отсутствовали. Пробой в сверхзвуковом потоке при направлении поля вдоль лазерного луча создает область тепловыделения, значительно превосходящую размерами плазму оптического разряда.

Заключение

Разработана и апробирована методика оптических измерений для регистрации структуры течения при взаимодействии сверхзвукового потока с электрическим и оптическим разрядами.

Рассмотрено два режима влияния внешнего электрического поля на плазму оптического разряда: электрическое поле направлено 1) по воздушному потоку, 2) поперек воздушного потока. Были использованы плоские и кольцевые электроды.

Экспериментально показана возможность одновременного существования оптического и электрического разрядов.

Обнаружено два режима совместного существования плазмы оптического и электрического разрядов. В первом электрический разряд располагался между плазмой оптического разряда и одним из электродов. Во втором случае электрический разряд располагался между электродами с одновременным существованием оптического разряда.

Эффект от реализации в потоке совместно оптического и электрического разрядов приведет к дополнительному энергетическому воздействию на структуру течения и тем самым может улучшить условия для иницирования горения и стабилизации топливных смесей, приближаясь к квазистационарному режиму энергетического воздействия на сверхзвуковое течение. Следует не забывать, что при определенных условиях электрическое поле гасит оптический разряд.

Список литературы

1. **Tran X. Phuoc.** Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review). *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, vol. 44, pp. 351–397.
2. **Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н.** Воздействие лазерного излучения и электрического поля на горение углеводородовоздушных смесей // ФГВ. 2009. Т. 45, № 4. С. 77–85.
3. **Зудов В. Н., Грачев Г. Н., Смирнов А. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В., Крайнев В. Л.** Иницирование горения оптическим разрядом в сверхзвуковой метановоздушной струе // ФГВ. 2013. Т. 49, № 2. С. 144–147.
4. **Зудов В. Н., Третьяков П. К.** Иницирование оптическим разрядом гомогенного горения топливовоздушной смеси в высокоскоростной струе // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, вып. 3. С. 18–26.
5. **Райзер Ю. П.** Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
6. **Асиновский Э. И., Василяк Л. М., Нестеркин О. П.** Волна потенциала при электрическом пробое вдоль длинной лазерной искры // ТВТ. 1997. Т. 35, № 6. С. 858–865.
7. **Takahashi E., Sakamoto S., Imamura O., Ohkuma Y., Yamasaki H., Furutani H., Akiham K.** Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, no. 52, p. 485501 (11 p.)
8. **Зворыкин В. Д., Николаев Ф. А., Холин И. В., Чугунов А. Ю., Шелоболин А. В.** Иницирование протяженных сильноточных разрядов длинной лазерной искрой // Физика плазмы. 1979. Т. 5. С. 1140–1144.
9. **Данилычев О. Б., Тульский С. А.** Исследование характеристик электрического пробоя, инициируемого длинной лазерной искрой в воздухе // ЖТФ. 1978. Т. 48. С. 2040–2043.
10. **Leonov S. B., Firsov A. A., Shurupov M. A., Michael J. B., Shneider M. N., Miles R. B., Popov N. A.** Femtosecond laser guiding of a high-voltage discharge and the restoration of dielectric strength in air and nitrogen. *Physics of Plasmas*, 2012, no. 19, p. 123502.
11. **Aurelien Houard, Yi Liu, Bernard Prade, Vladimir T. Tikhonchuk, Andre Mysyrowicz.** Strong Enhancement of Terahertz Radiation from Laser Filaments in Air by a Static Electric Field. *Physical Review Letters*. 2008, pp. 1–4, 0031-9007-08-100(25), 255006.
12. **Kopeika N. S., Gellman R., Kushelevsky A. P.** Improved detection of ultraviolet radiation with gas-filled phototubes through photoionization of excited atoms. *Appl. Opt.*, 1977, no. 16, pp. 2470–2476.
13. **Hahn D. W., Omenetto N.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part I: Review of basic diagnostics and plasma particle interactions: Still-challenging issues within the analytical plasma community. *Appl. Spectrosc.*, 2010, vol. 64 (12), pp. 335A–366A.
14. **Hahn D. W., Omenetto N.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: Review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Appl. Spectrosc.*, 2012, vol. 66 (4), pp. 347–419.

15. **Kushner M. J., Milroy R. D., Kimura W. D.** A laser-triggered spark gap model. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58 (8), pp. 2988–3000.
16. **Forestier B. et al.** Triggering, guiding and deviation of long air spark discharges with femto-second laser filament. *AIP Advances*, 2012, no. 2, p. 012151.
17. **Takashi Fujii, Alexei Zhidkov, Megumu Miki et al.** Dynamics and Kinetics of laser-filament plasma in strong external electric fields and applications. *Chinese journal of physics*, 2014, vol. 52, no. 1-11, pp. 440-464. DOI 10.6122/CJP.52.440
18. **Никулин В. Я., Цыбин С. П., Гурей А. Е.** О разряде в лазерной плазме во внешнем электрическом поле // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. № 6. С. 15–21.
19. **Kumar V., Thareja R. K.** Laser induced gas breakdown in the presence of a static electric field. *Journal of Applied Physics*, 1988, no. 64, pp. 5269–5271.
20. **Takahashi E., Sakamoto S., Imamura O., Ohkuma Y., Yamasaki H., Furutani H., Akihamma K.** Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, no. 52, p.485501 (11 p.).
21. **Tulip J., Seguin H.** Influence of a transverse electric field on laser-induced gas breakdown. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 23, no. 3, pp. 135–136.
22. **Takahashi E., Kato S.** Influence of DC electric field on Nd:YAG laser-induced breakdown in gases. *OSAC*, 2020, vol. 3, no. 11/15, pp. 3030–3039. DOI 10.1364/OSAC.399530
23. **Ruth Ann Mullen, Jesse N. Matossian.** Quenching optical breakdown with an applied electric field. *Optics Letters*, 1990, vol. 15, no. 11, pp. 601–603.

References

1. **Tran X. Phuoc.** Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review). *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, vol. 44, pp. 351–397.
2. **Tretyakov P. K., Tupikin A. V., Zudov V. N.** Effect of Laser Radiation and Electric Field on Combustion of Hydrocarbon-Air Mixtures. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 413–420..
3. **Zudov V. N., Grachev G. N., Krainev V. L., Smirnov A. L., Tretyakov P. K., Tupikin A. V.** Combustion initiation by an optical discharge in a supersonic methane-air jet. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 254–256.
4. **Zudov V. N., Tretyakov P. K.** Initiation of homogeneous combustion in a high-velocity jet of a fuel-air mixture by an optical discharge. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 262–269.
5. **Raizer Yu. P.** Laser-Induced Discharge Phenomena. New York, Consultants Bureau, 1977.
6. **Asinovsky E. I., Vasilyak L. M., Nesterkin O. P.** Potential wave under conditions of electric breakdown along an extended laser-induced spark. *TVT*, 1997, vol. 35, no. 6, pp. 858–865. (in Russ.)
7. **Takahashi E., Sakamoto S., Imamura O., Ohkuma Y., Yamasaki H., Furutani H., Akihamma K.** Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, no. 52, p. 485501 (11 p.)
8. **Zvorykin V. D., Nikolaev F. A., Kholin I. V., Chugunov A. Yu., Shelobolin A. V.** Initiation of extended high-current discharges by a long laser spark. *Plasma Physics Reports*, 1979, vol. 5, no. 5, p. 638.
9. **Danilychev O. B., Tulskey S. A.** Investigation of the characteristics of electrical breakdown initiated by a long laser spark in air. *J. Technical Physics*, 1978, vol. 48, pp. 2040–2043.
10. **Leonov S. B., Firsov A. A., Shurupov M. A., Michael J. B., Shneider M. N., Miles R. B., Popov N. A.** Femtosecond laser guiding of a high-voltage discharge and the restoration of dielectric strength in air and nitrogen. *Physics of Plasmas*, 2012, no. 19, p. 123502.

11. **Aurelien Houard, Yi Liu, Bernard Prade, Vladimir T. Tikhonchuk, Andre Mysyrowicz.** Strong Enhancement of Terahertz Radiation from Laser Filaments in Air by a Static Electric Field. *Physical Review Letters*. 2008, pp. 1–4, 0031-9007-08-100(25), 255006.
12. **Kopeika N. S., Gellman R., Kushelevsky A. P.** Improved detection of ultraviolet radiation with gas-filled phototubes through photoionization of excited atoms. *Appl. Opt.*, 1977, no. 16, pp. 2470–2476.
13. **Hahn D. W., Omenetto N.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part I: Review of basic diagnostics and plasma particle interactions: Still-challenging issues within the analytical plasma community. *Appl. Spectrosc.*, 2010, vol. 64 (12), pp. 335A–366A.
14. **Hahn D. W., Omenetto N.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: Review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Appl. Spectrosc.*, 2012, vol. 66 (4), pp. 347–419.
15. **Kushner M. J., Milroy R. D., Kimura W. D.** A laser-triggered spark gap model. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58 (8), pp. 2988–3000.
16. **Forestier B. et al.** Triggering, guiding and deviation of long air spark discharges with femto-second laser filament. *AIP Advances*, 2012, no. 2, p. 012151.
17. **Takashi Fujii, Alexei Zhidkov, Megumu Miki et al.** Dynamics and Kinetics of laser-filament plasma in strong external electric fields and applications. *Chinese journal of physics*, 2014, vol. 52, no. 1-11, pp. 440-464. DOI 10.6122/CJP.52.440
18. **Nikulin V. Ya., Tsybin S. P., Gurei A. E.** On the Discharge in Laser Plasma in an External Electric Field. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2017, vol. 44, no. 6, pp. 163–167.
19. **Kumar V., Thareja R. K.** Laser induced gas breakdown in the presence of a static electric field. *Journal of Applied Physics*, 1988, no. 64, pp. 5269–5271.
20. **Takahashi E., Sakamoto S., Imamura O., Ohkuma Y., Yamasaki H., Furutani H., Akiham K.** Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, no. 52, p.485501 (11 p.).
21. **Tulip J., Seguin H.** Influence of a transverse electric field on laser-induced gas breakdown. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 23, no. 3, pp. 135–136.
22. **Takahashi E., Kato S.** Influence of DC electric field on Nd:YAG laser-induced breakdown in gases. *OSAC*, 2020, vol. 3, no. 11/15, pp. 3030–3039. DOI 10.1364/OSAC.399530
23. **Ruth Ann Mullen, Jesse N. Matossian.** Quenching optical breakdown with an applied electric field. *Optics Letters*, 1990, vol. 15, no. 11, pp. 601–603.

Информация об авторах

Владимир Николаевич Зудов, доктор физико-математических наук
Андрей Викторович Тупикин, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Vladimir N. Zudov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)
Andrey V. Tupikin, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

Статья поступила в редакцию 19.04.2021;
одобрена после рецензирования 20.05.2021; принята к публикации 01.06.2021
The article was submitted 19.04.2021;
approved after reviewing 20.05.2021; accepted for publication 01.06.2021