

А.К. Ошлаков*, В.К. Ошлаков, В.П. Галилейский, А.С. Колеватов, А.М. Морозов, А.И. Петров

ОПТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУХА ИЗЛУЧЕНИЕМ ШИРОКОСПЕКТРАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

*Институт оптики атмосферы, Томск
НИИ системотехники, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 30.12.98 г.

Принята к печати 2.03.99 г.

Описан впервые наблюдаемый в эксперименте эффект оптического пробоя воздуха мощным импульсом излучения от широкоспектрального некогерентного источника света.

До 1963 г. любое предположение об оптическом пробое с использованием средств фокусировки лучей даже самых мощных по тем временам источников казалось совершенно фантастическим [1]. Пробой газа под действием сфокусированного лазерного излучения впервые наблюдался (в 1963 г.) после того, как были созданы рубиновые и неодимовые лазеры с модулированной добротностью, которые дают короткий, примерно $3 \cdot 10^{-8}$ с, импульс с пиковой мощностью в десятки мегаватт. Явление получило название лазерной искры. В короткий срок оптический пробой в газах, а также связанные с ним процессы развития ударных и детонационных волн были подробно исследованы теоретически и экспериментально [1–3]. Согласно [1, 3] признаками оптического пробоя в воздухе являются: видимая вспышка в фокусе линзы или зеркала, появление проводимости типа металлической и характерный звук, связанный с искровым разрядом и развитием ударных и детонационных волн. И хотя все экспериментальные данные по оптическому пробую были получены с использованием лазерных источников, с точки зрения физики процесса нет противопоказаний для использования широкоспектральных (немонокроматических) импульсных источников света.

Использование для оптического пробоя мощных широкоспектральных источников со стабильными спектральными характеристиками излучения (например, дуговых ксеноновых ламп) привлекательно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения расширения области исследования взаимодействия мощного импульсного излучения с веществом. Авторами статьи были проведены эксперименты на установке, в которой в качестве источника импульсного излучения использовались дуговые ксеноновые лампы высокого давления: стандартная типа ДКСШ-3000 и опытный образец, предназначенный для работы в импульсном режиме, на базе лампы ДКСШ-4000 (Томский электроламповый завод). Следует отметить, что лампа ДКСШ-3000 не предназначена для эксплуатации в импульсном режиме и при проведении эксперимента учитывалось это обстоятельство.

Излучение ламп типа ДКСШ характеризуется непрерывным спектром в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях. В ближней ИК-области спектра помимо непрерывного имеется также интенсивное линейчатое излучение в интервале длин волн от 800 до

1000 нм. Нижняя граница в УФ-области спектра для ламп ДКСШ-3000 – 210...220 нм, для ламп ДКСШ-4000 – 300...310 нм.

Основой оптической схемы являлись два параболических зеркала, расположенных на одной оптической оси, одно из которых служило передатчиком, а второе – приемником излучения дуговой ксеноновой лампы. В фокусе первого зеркала (диаметр 46 см, фокусное расстояние 12 см) был расположен источник излучения. Приемник излучения – параболическое зеркало диаметром 64 см с фокусным расстоянием 27 см – располагался на расстоянии от 2 до 7,5 м от передатчика. Площадь фокусного пятна зависела от формы и размера дуги в лампе, от параметров оптических элементов и от точности настройки системы. В эксперименте, результаты которого в данной статье приведены в качестве примера пробоя в воздухе, это значение не превосходило 1 см^2 , а минимальное зарегистрированное значение площади фокусного пятна на данной схеме равнялось $0,03 \text{ см}^2$.

Для формирования импульсов разрядного тока в лампе использовался специально разработанный блок питания установки. Емкость разрядной батареи – от сотен до единиц микрофарад. Напряжение – от сотен вольт до 30 кВ. Характер разряда – колебательный процесс. Зарегистрировано до десятка периодов колебаний в процессе разряда с максимальной амплитудой и выделением энергии в первом полупериоде. Длительность генерируемых установкой световых импульсов – от десятков микросекунд до миллисекунд. По нашим оценкам, КПД системы, с учетом коэффициента преобразования электрической энергии в световую для ксеноновых дуговых ламп [4], коэффициента «перехвата» потока излучения зеркалами и коэффициентов отражения поверхности зеркал, был не менее 0,1 и не более 0,2.

В результате экспериментов зарегистрированы: вспышка, появление проводимости и характерный звук, сопровождающие разряд в фокусе параболического зеркала при значениях длительности светового импульса порядка 10^{-5} с и плотности потока световой энергии порядка 10^8 – $10^9 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Для регистрации вспышки в фокусном пятне использовалась сопряженная с осциллографом фотометрическая установка на базе ФЭУ-79 (полоса частот усилителя тока до 20 МГц) и видеокамера, сопряженная с компьютером. Пробой регистрировался как в воздухе, так

и при воздействии на различные мишени. Возникновение проводимости в момент оптического пробоя в воздухе регистрировалось по изменению заряда конденсатора (100–200 В) [1], к выводам которого были присоединены два электрода, расстояние между их концами в фокусном пространстве второго зеркала было не более 0,5 см. Регистрация характерного звука, сопровождающего разряд в воздухе, осуществлялась с помощью сопряженного с компьютером комплекта измерительных приборов акустики и вибротехники (VEB RFT Messelelectronic «Otto-Schon», Dresden) в составе: конденсаторный измерительный микрофон МК-301 (20 Гц ... 100 кГц), предусилитель MV-201, микрофонный усилитель MKD 00011. Фонограмма пробоя при облучении мишени дает значение амплитуды звуковой волны, во много раз превосходящее значение амплитуды при пробое в воздухе, что учитывалось при контроле линейности режима регистрирующей установки.

При воздействии на плоские мишени из различных материалов (металлы и неметаллы) наблюдался эффект «пристеночного» развития плазменного облака. Мишенями являлись плоские поверхности – белый ватман, черная бумага, эмульсионный слой фотобумаги, алюминиевая конденсаторная фольга и фторопластовая пленка различной толщины. При длительности импульса порядка десятков микросекунд по размеру пробитого в фольге отверстия оценивались значения площади фокусного пятна. В этом случае зона пробоя представляла собой «выжженную» поверхность с множеством микроскопических сквозных отверстий. В результатах эксперимента отмечено, что при длительности импульса порядка миллисекунд и значениях разрядного напряжения порядка 10 кВ в фольге проплавлялось отверстие диаметром больше поперечника зоны фокусировки, а другие мишени просто сгорали.

На рис. 1, 2 приведены распечатки видеокadres оптического пробоя воздуха в фокусе зеркала (рис. 1) и от поверхности, расположенной в околофокусном пространстве мишени (рис. 2). Приведенный на рис. 2 масштаб применим и к рис. 1. В первых кадрах (рис. 1,а и 2,а) зафиксирован фон, отмечено направление излучения и ориентировочно – угол фокусировки излучения. В кадре рис. 1,б,в зафиксирована одна из стадий развития искры. На кадре рис. 1,в специальной обработкой изображения (рис. 1,б) удален фон. На рис. 2 представлены три последовательных кадра видеозаписи облучения поверхности листовой фотопленки. В кадре рис. 2,б зарегистрированы вспышка и яркое облако плазмы, образовавшейся в результате облучения испарившегося вещества мишени. В кадре рис. 2,в – выброс остывающего облачка испарившегося вещества мишени в сторону зеркала.

На рис. 3 приведены фонограммы процесса оптического пробоя. По оси ординат отложены относительные амплитуды, по оси абсцисс – время, мс. Так как расстояние между зеркалами было порядка 7,5 м, то на фонограммах запись звука, сопровождающего импульсный разряд в лампе, появляется через время, необходимое для прохождения звуковой волной расстояния от лампы до зеркала-приемника (отмечено пунктирной линией). На фонограммах в этот интервал времени зарегистрирована звуковая волна, сопровождающая оптический пробой, вызванный концентрацией импульса оптического излучения в атмосфере или на поверхности мишени, помещенной в зоне фокуса параболического зеркала. При концентрации излучения в воздухе микрофон был расположен на расстоянии ~1,5 см от точки фокуса зеркала, при облучении мишени – на расстоянии 5 см от нее. На верхней фонограмме (пробой от мишени) шаг по шкале относитель-

ных амплитуд сжат в 10 раз по сравнению с шагом на нижнем графике (пробой в воздухе). В обоих случаях длительность записи звуковой волны превосходит длительность разряда в воздухе, что также соответствует описанию развития ударной и детонационной волн при оптическом разряде в воздухе [1].

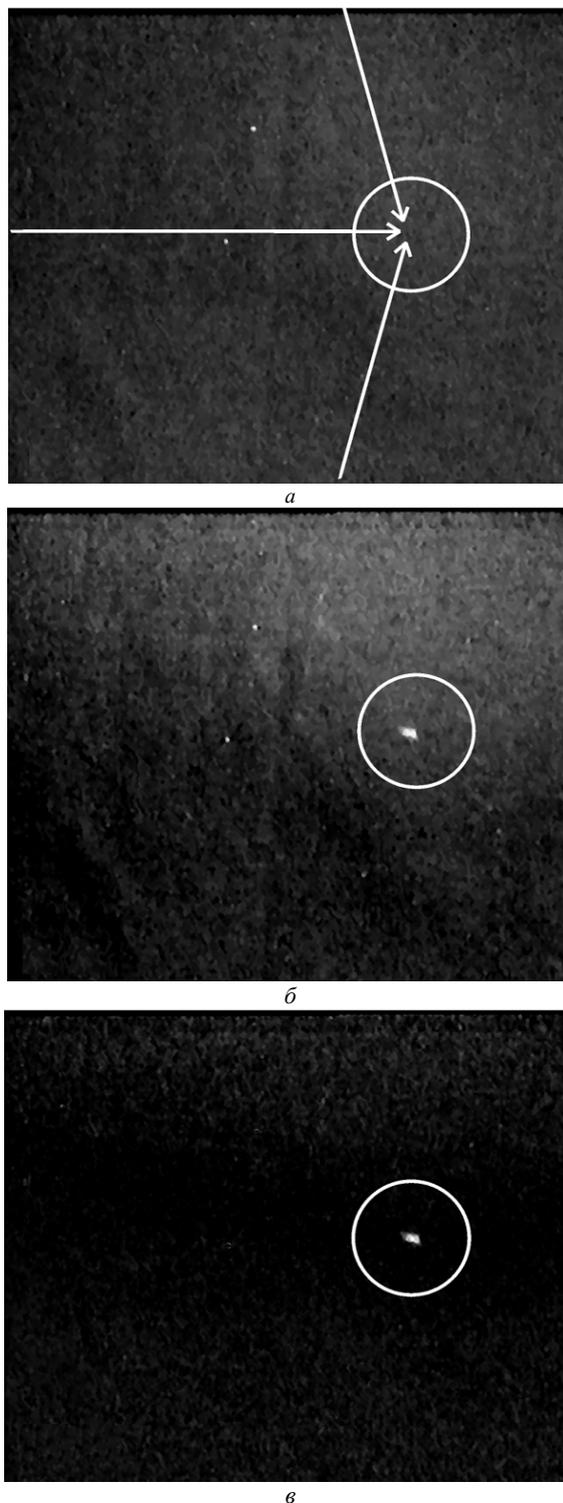


Рис. 1. Видеокadres пробоя в воздухе в фокусе зеркала: а – фон и схема облучения; б – искра; в – кадр б за вычетом фона (масштаб совпадает с масштабом на рис. 2)

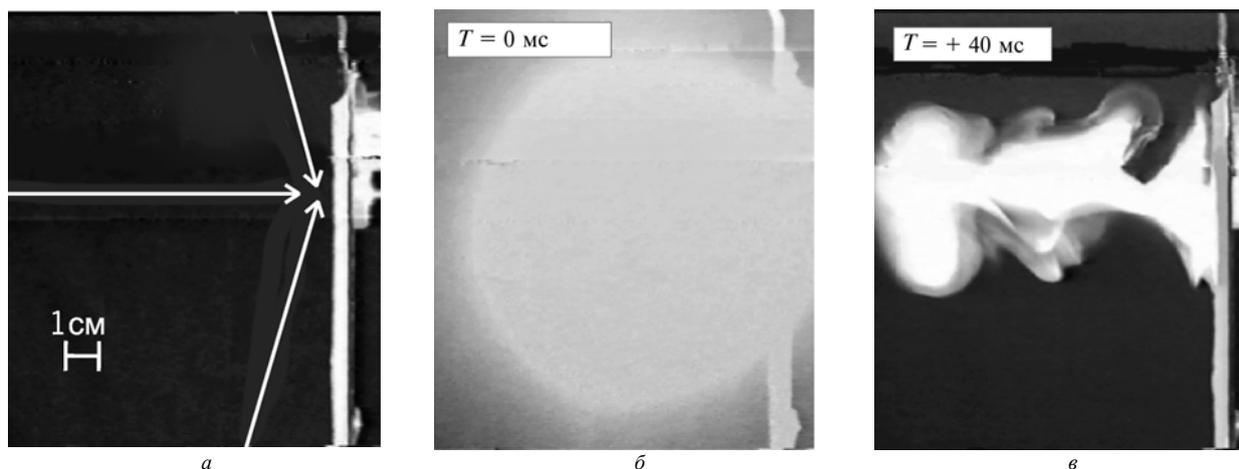


Рис. 2. Видеокадры пробоя при фокусировке излучения на поверхность мишени (фотоэмульсия): *a* – фон, схема облучения и масштаб; *б* – вспышка и развитие плазменного облака; *в* – вылет продуктов испарения вещества мишени

По совокупности зарегистрированных в процессе эксперимента признаков авторами статьи сделан вывод о том, что при концентрации (в данном случае – параболическим зеркалом) светового импульса излучения мощной дуговой ксеноновой лампы в фокусе зеркала возникает оптический пробой воздуха. Оценки по порядку величин дают следующие значения: электрическая энергия пробоя в лампе (при значениях емкости порядка сотен микрофарад и напряжения порядка 10^4 В) порядка 10^4 Дж, мощность импульса (при длительности порядка 10^{-5} с) – порядка 10^8 – 10^9 Вт, значение коэффициента потерь при преобразовании электрической энергии в световую с учетом потерь на оптических элементах – порядка 10^{-1} , значение площади пятна фокусировки – порядка $10^0 \dots 10^{-2}$ см².

Таким образом, в зоне фокусировки светового импульса можно создать поверхностную плотность светового потока порядка сотен мегаватт на сантиметр в квадрате и выше, достаточную для пробоя в воздухе при атмосферном давлении [1–3]. По мнению авторов, в этом эксперименте использованы оба известных механизма ионизации в зоне

концентрации мощного импульса светового излучения: развитие электронной лавины в поле световой волны и многоквантовый фотоэффект. Длительность светового импульса позволяет применять критерии «стационарного» пробоя [1]. Учет объема ионизации (не менее 1 см³) дает значение времени диффузии электронов, по порядку величины совпадающее с длительностью импульса. Учет условия спектрального распределения энергии светового импульса (9% в ультрафиолете, 35% в видимом диапазоне и 56% в ближней ИК-области [4]) делает многоквантовый фотоэффект предпочтительным объяснением причины возникновения наблюдаемого в эксперименте эффекта ионизации и оптического пробоя в фокусе зеркала. Коллебательный характер разряда создает условия для последовательного воздействия на электроны и возбуждения атомов атмосферного газа в поле световой волны с последующей их ионизацией в процессе развития электронной лавины и, возможно, возникновения серии оптических пробоев в период длительности светового воздействующего импульса.

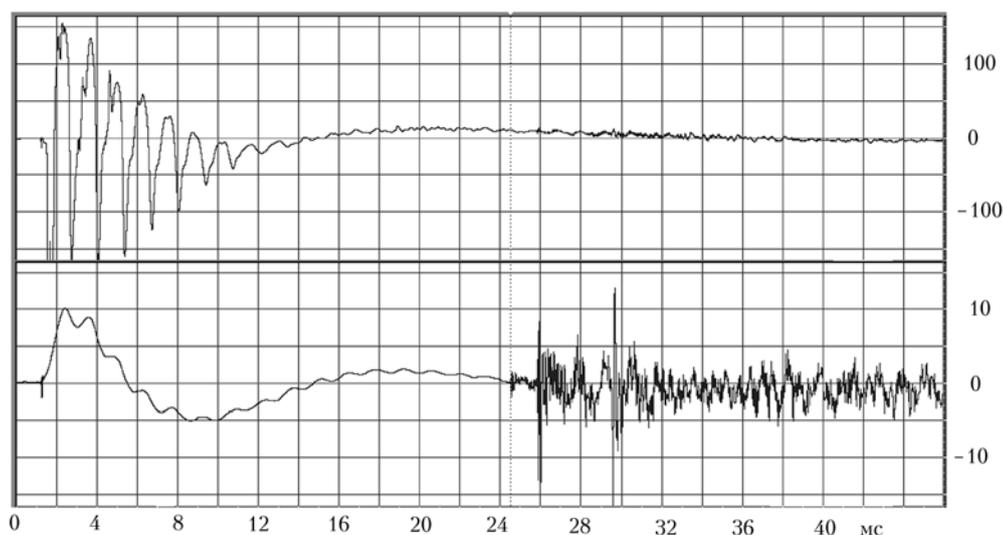


Рис. 3. Фонограммы, полученные при оптическом пробое. Верхний график – фонограмма пробоя при облучении поверхности мишени, помещенной в фокусное пространство ($U = 3000$ В, $C = 1000$ мкФ, $\tau = 150$ мкс); нижний – фонограмма пробоя воздуха в фокусе зеркала ($U = 7000$ В, $C = 100$ мкФ, $\tau = 50$ мкс)

По мнению авторов, полученный эффект не противоречит физическим основам явления оптического пробоя и требует дальнейшего изучения для практического применения.

1. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.

2. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

4. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.

A.K. Oshlakov, V.K. Oshlakov, V.P. Galileiskii, A.S. Kolevatov, A.M. Morozov, A.I. Petrov. **Optical Break-down of Air Caused by Broad-Band Radiation Source.**

The effect of optical break-down of the air produced by high-intensity radiation pulse from a broad-band source of incoherent light is described, which was first observed experimentally.