

ВТОРИЧНЫЙ ПРОБОЙ НА ГРАНИЦАХ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ВОЗДУХЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА

Б.В. Ершов, С.Б. Кравцов, А.М. Прохоров, В.А. Спиридонов,
В.Б. Федоров

УДК 621.384.4

При взаимодействии микросекундного импульса с плазмой лазерной искры после оптического пробоя воздуха на границе холодного газа и плазмы сначала за искрой, а затем и перед ней возникает вторичный пробой холодного газа. Обнаруженный эффект объяснен самофокусировкой лазерного излучения в плазме искры.

В работах /1, 2/ сообщалось об исследовании сверхзвукового распространения оптического разряда в атмосферном воздухе из области лазерной искры в направлении луча неодимового лазера. В этих опытах микросекундным пичком неодимового лазера, работавшего в режиме свободной генерации, создавался оптический пробой воздуха. Поскольку продолжительность пичка свободной генерации намного превышала время развития пробоя, в тех же опытах изучалось взаимодействие этого импульса с возникшей плазмой. Через несколько микросекунд после пробоя, когда мощность излучения уменьшалась почти в 3 раза, на дальней от лазера границе плазмы наблюдался вторичный пробой холодного газа, сопровождающийся распространением в направлении луча лазера сверхзвукового фронта ионизации.

В данной работе исследовались условия возникновения вторичного пробоя. Постановка экспериментов существенно отличалась от описанной в /2/. Во-первых, первичный и вторичный пробой создавались двумя отдельными лазерными импульсами, разнесенными по времени. Первый импульс был коротким и мощным, а второй более продолжительным и с значительно меньшей амплитудой. В интервале между лазерными импульсами давление в плазме и окружающем газе выравнивалось. Во-вторых, области фокусировки излучения в первом и втором импульсах были разнесены на расстояние ≈ 1 см вдоль оси линзы. Второй импульс фокусировался вблизи передней границы плазмы разряда. Тем не менее, вторичный пробой возникал сначала на задней границе лазерной искры, а лишь затем, через время ~ 1 мкс, соот-

ветствующее достижению максимума амплитуды второго импульса, и на ее передней границе, где интенсивность падающего излучения ненамного отличалась в этот момент от порога пробоя холодного газа. Сравнение условий вторичного инициирования плазмы на задней и передней границах лазерной искры в воздухе позволяет сделать заключение о наличии процесса типа самофокусировки падающего излучения в квазистационарной плазме и дать количественные характеристики этого процесса.

В опытах для генерации двух лазерных импульсов использовались разные неодимовые лазеры на прямоугольных активных элементах с модуляцией добротности излучения пассивным затвором на кристаллах LiF с F_2^- -центрами окраски /3/. Излучение обоих лазеров с апертурами $4 \times 14 \text{ см}^2$ фокусировалось одной общей линзой с фокусным расстоянием 1 м в расположенные на оси линзы пятна размерами $0,4 \times 0,55 \text{ мм}^2$ и $0,4 \times 0,3 \text{ мм}^2$ соответственно для первого и второго лазеров. Пятно фокусировки излучения второго лазера находилось ближе к линзе на $\approx 1 \text{ см}$, чем фокальное пятно первого лазера. Лазеры имели энергии излучения 45 и 7 Дж и длительности импульсов 0,3 и 1,5 мкс. Соответственно интенсивности излучения (по уровню половины энергии) в зоне фокусировки достигали величин $4 \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ и $2 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$. Существенное повышение длительности импульса генерации второго лазера получено за счет применения резонатора увеличенной длины.

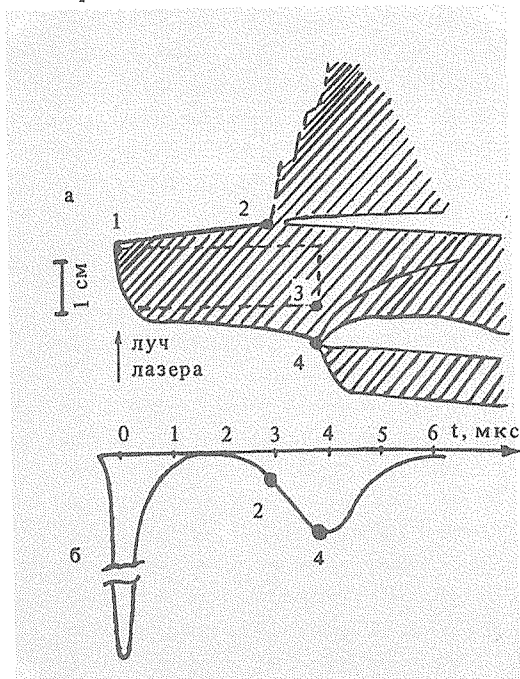
Экспериментально фиксировались скоростной фотокамерой щелевая развертка собственного свечения плазмы, а также осциллограммы свечения плазмы и временного хода падающего лазерного излучения.

В опыте, показанном на рис. 1, вторичный пробой на задней границе искры возникал через время $t \approx 3 \text{ мкс}$ (точка 2) после первичного пробоя (точка 1) в начале действия на плазму второго лазерного импульса. И только вслед за ним в момент $t \approx 4 \text{ мкс}$ вблизи максимума амплитуды микросекундного импульса происходил вторичный пробой на передней границе лазерной искры. Расчетная интенсивность падающего излучения, соответствующая точке 4 на рис. 1, составляла $0,8 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ в то время, как в точке 2, удаленной от области фокусировки, она была намного меньше и приблизительно равнялась (с учетом поглощения в слое плазмы) $3 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$.

Поскольку величина интенсивности в точке 4 мало отличается от порога пробоя холодного воздуха $(1 \div 2) \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ /2/, то следует считать, что механизмы ионизации холодного газа в точках 4 и 2 (рис. 1) близки, и наличие границы плазма – холодный газ не вносит больших изменений в порог вторичного пробоя по сравнению с первичным пробоем, когда такая граница отсутствует. Это означает, что и в точке 2 вторичный пробой происходил при значении интенсивности, близкой к 10^9 Вт/см^2 . Расхождение этой вели-

чины в 30 раз по сравнению с данным выше низким расчетным значением интенсивности в точке 2 прямо указывает на самофокусировку падающего излучения в плазме на квазистационарной стадии эволюции лазерной искры в момент времени t_2 и одновременно дает количественную характеристику процесса самофокусировки — поперечник луча в точке пробоя (точка 2) уменьшается в 5–6 раз.

Экспериментально определен временной интервал, когда на задней границе плазмы может происходить вторичный пробой. Для этого варьировалась задержка второго лазерного импульса относительно первого в пределах от 2 до 60 мкс. Обнаружено, что эффект вторичного пробоя возникал при задержках от 3 до 40 мкс.



Р и с. 1. Шелевая развертка (щель фоторегистратора ориентирована вдоль оси фокусирующей линзы) собственного свечения оптического разряда (а) и осциллограмма импульсов лазерного излучения (б). Штриховкой обозначена область свечения плазмы разряда, линиями показаны границы и плазменные фронты разряда (а), пунктир указывает положение области фокусировки первого и второго лазерного импульсов (точки 1 и 3). Точками 1, 2, 4 обозначены пространственно-временные координаты первичного пробоя воздуха (1) и вторичного пробоя на задней (2) и передней (4) границах лазерной искры в воздухе.

Для оценки оптической силы плазменной самофокусировки уменьшалась интенсивность падающего на плазму излучения. В соответствующем контрольном опыте в качестве второго генератора и использовался неодимовый лазер с полуконфокальным резонатором, работавший в режиме "гладкого" импульса длительностью 0,3 мс. В этом случае при расчетной интенсивности около 10^6 Вт/см² вторичный пробой не наблюдался. Следовательно, вторич-

ный пробой на задней границе искры возникает, если интенсивность падающего излучения в точке пробоя без учета плазменной фокусировки лежит в интервале значений от 10^6 до $3 \cdot 10^7$ Вт/см².

Самофокусировка излучения в плазме искры является, по-видимому, также причиной различия картины распространения фронтов плазмы сзади искры и перед ней после вторичного пробоя (рис. 1). По нашим данным скорость "убегающего" фронта ионизации в точке 2 составляет $V = (0,5-1) \times 10^7$ см/с и значительно выше скорости фронта ионизации, распространяющегося от точки 4 навстречу лазерному лучу. Кроме того, скорость V в условиях опыта слабо зависела от интенсивности падающего излучения. Можно предположить, что "убегающий" фронт ионизации является волной пробоя. Необходимая скорость распространения фронта пробоя в таком случае должна поддерживаться либо перемещением плазменной линзы вдоль луча, либо ее перефокусировкой. Возможна в принципе также плазменная фокусировка типа оксикона (линза в форме конуса), когда необходимый уровень интенсивности излучения вдоль оси линзы обеспечивается за счет разных участков апертуры падающего лазерного луча.

Институт общей физики АН СССР Поступила в редакцию 8 августа 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов Б.В. и др. У Всесоюзное совещание по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. Тезисы докладов. Ленинград, 1981, с. 212.
2. Ершов Б.В. и др. Письма в ЖТФ, 9, вып. 12, 722 (1983).
3. Басиев Т.Т. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 36 (1984).