

04;07

## Особенности взаимодействия встречных плазменных фронтов при лазерном пробое в нормальной атмосфере

© О.А. Букин, А.А. Ильин, И.Г. Нагорный,  
А.Н. Павлов, А.В. Буланов

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток  
E-mail: o\_bukin@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2006 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований взаимодействия встречных плазменных фронтов при лазерном пробое в нормальной атмосфере. Зарегистрировано увеличение интегральной светимости при взаимодействии лазерных плазм. Показано, что увеличение интегральной светимости излучения взаимодействующих плазм зависит от режима движения фронтов и достигает до 85% по сравнению со случаем невзаимодействующих плазм. При этом наблюдается значительное увеличение интенсивности эмиссионных линий на фоне непрерывного излучения лазерной плазмы.

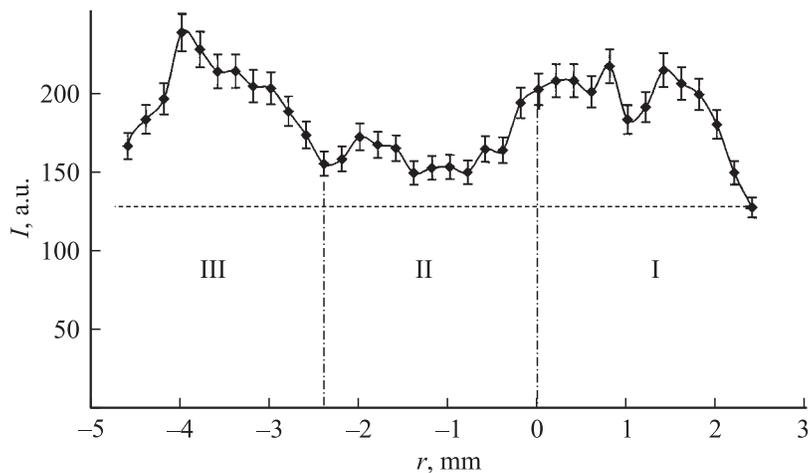
PACS: 52.80.Tw, 52.30.Ex

Интерес к исследованию режимов распространения плазменных фронтов и механизмов их взаимодействия вызван тем, что взаимодействие лазерных плазм может быть использовано в различных приложениях. Одно из таких приложений связано с разработкой методов разогрева лазерной плазмы, так в работе [1] зарегистрировано значительное увеличение температуры плазмы в области столкновения фронтов. Взаимодействие фронтов лазерной плазмы используется также в работах, направленных на повышение контраста эмиссионных линий элементов в плазме для повышения чувствительности метода лазерной искровой спектроскопии, использование комбинации нескольких гигантских импульсов при возбуждении лазерной плазмы позволяет значительно улучшить чувствительность этого метода при измерении концентрации элементов [2,3].

В настоящей работе приведены результаты регистрации интегральной светимости фронтов лазерных плазм, распространяющихся в раз-

личных режимах во встречных направлениях, а также исследована динамика сплошного и эмиссионного спектра лазерной плазмы в зонах взаимодействия. Для возбуждения оптического пробоя использовались первая и вторая гармоника излучения Nd:YAG лазера Brilliant B с энергией в импульсах 360 и 180 мДж при длительности лазерного импульса 5 и 4 нс соответственно, фокусное расстояние линз 15 мм. Положение фронтов определялось по изображению плазменного факела, полученного на оптическом многоканальном анализаторе спектров „Flame Vision Pro System“, который обеспечивал временное разрешение не хуже 3 нс. Анализ  $r-t$  диаграмм движения плазменных фронтов и зависимости скорости фронтов от расстояния показал, что на первых стадиях разлета плазменный фронт распространяется навстречу лазерному излучению в режиме быстрой волны ионизации [4], а в направлении распространения лазерного излучения — в режиме светодетонационной волны [5]. Максимальные скорости движения плазменных фронтов навстречу лазерному излучению составили величины порядка 300 км/с, в направлении распространения лазерного излучения — порядка 80 км/с.

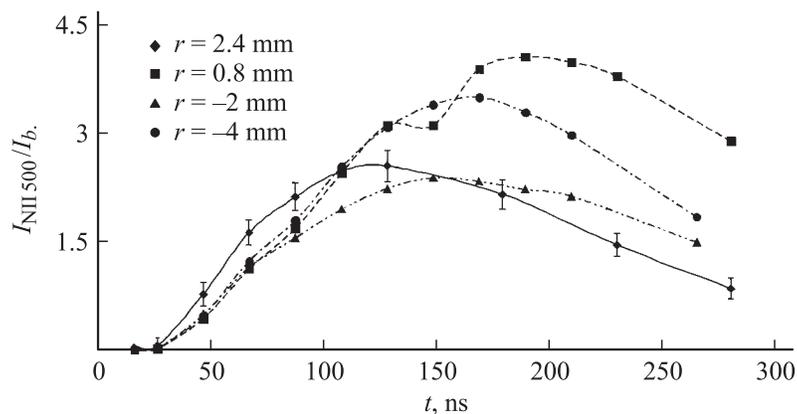
Изучение параметров свечения лазерной плазмы при взаимодействии фронтов, распространяющихся во встречных направлениях, проводилось на специально созданной экспериментальной установке. Первоначально области пробоя смещались на такое расстояние, чтобы визуально взаимодействие фронтов не наблюдалось (что соответствовало расстоянию более 3 мм между точками фокусировки), далее происходило дискретное (с шагом 0.2 мм) уменьшение расстояния между фокусами путем смещения одной из фокусирующих линз. Таким образом, до совпадения фокусов происходило взаимодействие двух лазерных плазм, движущихся в направлении распространения своего луча. Далее по мере сближения областей пробоя происходило их „слипание“ и наблюдалось начало взаимодействия фронтов лазерных плазм, распространяющихся навстречу каждому из лазерных импульсов. В этом случае взаимодействие фронтов осуществлялось в режиме быстрой волны ионизации. Для каждого фиксированного расстояния регистрировалось изображение (12-битный цифровой снимок) двух лазерных плазм, включая области их взаимодействия. Значение общей светимости рассчитывалось суммированием значений интенсивности излучения по всем пикселям изображения, исключая интенсивность фона, которая оценивалась по периферийным пикселям изображения. Зависимость полученной таким образом интегральной интенсивности



**Рис. 1.** Интегральная интенсивность.

от расстояния между точками фокусировки представлена на рис. 1. По горизонтальной оси рисунка отложены расстояния между фокальными точками, при этом положительные значения соответствуют расстоянию между фокусами до пересечения, отрицательные — после пересечения фокусов, т.е. случаю, когда один пучок фокусируется за фокальную точку другого. По вертикальной оси отложены значения интегральной интенсивности области пробоя. Штриховой линией обозначено значение интегральной интенсивности излучения двух не взаимодействующих плазм. Из анализа рисунка следует, что существуют три ярко выраженные пространственные области.

Первая пространственная область лежит в диапазоне расстояний между фокусами от +2.2 до 0 mm, т.е. соответствует случаю, когда взаимодействующие плазменные факела движутся в направлении распространения своего луча в режиме светодетонационной волны. В этой области наблюдается увеличение интегральной интенсивности свечения плазмы до 70% относительно интегральной интенсивности не взаимодействующих плазм. Вторая пространственная область лежит в диапазоне от 0 до -2.4 mm. Одной из ее характерных особенностей является образование единого плазменного факела. Во второй области



**Рис. 2.** Отношение интенсивности мультиплета азота к интенсивности фона.

наблюдается увеличение интегральной интенсивности свечения плазмы до 20%. Третья пространственная зона лежит в диапазоне от  $-2.4$  до  $-4.6$  мм, т.е. соответствует случаю, когда существуют два ярко выраженных плазменных факела, движущиеся навстречу лазерному излучению в режиме быстрой волны ионизации. В этой области наблюдается увеличение интегральной интенсивности свечения плазмы до 85%.

На рис. 2 представлена временная зависимость величины отношения интенсивности мультиплета однократно ионизованного азота ( $\lambda = 500$  нм) к интенсивности фона (непрерывного излучения плазмы) для трех обозначенных ранее пространственных зон и положения плазменных факелов, когда взаимодействие не наблюдалось. Как следует из рисунка, максимальное отношение, в случае невзаимодействующих факелов, наблюдается на 120 ns. При взаимодействии плазменных факелов в первой пространственной области максимальное отношение наблюдается на 190 ns от начала пробоя ( $r = 0.8$  мм). Отметим заметное увеличение временных интервалов, на которых наблюдаются большие значения отношений по сравнению со случаем невзаимодействующих факелов. Во второй пространственной области временное поведение величины отношений практически совпадает со случаем невзаимодействующих факелов ( $r = -2$  мм). В третьей пространствен-

ной области зарегистрировано меньшее увеличение отношения, по сравнению с первой областью максимальный контраст в этой области был зарегистрирован на 170 ns относительно начала пробоя ( $r = -4$  mm).

Таким образом, в случае столкновения лазерных плазм происходит значительное увеличение отношения интенсивности мультиплета к интенсивности фона. При этом в первой области увеличение отношения составило 62%, а во второй области — 40%. Кроме этого, при взаимодействии лазерных плазм зарегистрировано значительное увеличение временного интервала, когда наблюдаются большие значения величины отношения интенсивностей. Так, в первой и третьей пространственных областях взаимодействия, время, для которого отношение интенсивностей превышает максимальное значение для случая невзаимодействующих плазм, составило величину порядка 300 ns.

Работа поддержана грантами ДВО РАН № 06-III-B-02-062, 06-III-B-02-063.

## Список литературы

- [1] *Rancu O., Renaudin P., Chenais-Popovics C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 21. P. 3854–3857.*
- [2] *Букин О.А., Алексеев А.В., Ильин А.А. и др. // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 26–32.*
- [3] *St-Onge L., Sabsabi M., Cielo P. // Spectrochim. Acta Part B. 1998. V. 53. P. 407–415.*
- [4] *Копытин Ю.Д., Сорокин Ю.М., Скрипкин А.М. и др. Оптический разряд в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1990. 159 с.*
- [5] *Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.*