

УДК 519.542

# Исследование неоднородностей воздушной среды в области лазерного пробоя\*

Б. Г. Зималин, И. Н. Воронич,  
М. Г. Кузин, Н. Н. Рукавишников

*Экспериментально исследованы неоднородности воздушной среды, возникающие в области лазерного пробоя воздуха наносекундными импульсами в диапазоне энергий до 1 Дж при интенсивностях  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> в интервале времени до 5 нс от момента пробоя. Оценка масштаба и структуры неоднородностей воздушной среды в области лазерного пробоя позволяет учесть влияние фокусировки частично отраженных от поверхности линз лазерных пучков на пространственный профиль лазерного пучка в мощных многопроходных лазерных установках.*

## Введение

Проектирование оптического тракта мощной многопроходной лазерной установки – технически сложная задача, требующая ответов на ряд важных вопросов. Один из ключевых вопросов связан с возможностью расположения линз пространственных фильтров без значительного (порядка градуса) заклона относительно проходящего через них лазерного пучка. Необходимость заклона линз обусловлена локальным искажением пространственно-угловой структуры пучка на поздних проходах через силовой тракт вследствие его прохождения области лазерного пробоя воздуха, возникающего при фокусировке части пучка, отраженного от линз пространственных фильтров, на более ранних проходах. Посредством заклона линз частично отраженный пучок фокусируется вне области следования основного пучка и данного эффекта удастся избежать. Тем не менее, перспектива минимизации заклона линз видится предпочтительной, так как благодаря этому удастся снизить aberrации оптической системы, что, в свою очередь, повышает качество лазерного пучка.

В данной работе приведены основные результаты экспериментального исследования влияния неоднородностей воздушной среды, возникающих в области лазерного пробоя наносекундными импульсами, на искажение зондирующего лазерного пучка, проходящего сквозь область лазерного пробоя с различным временным запаздыванием относительно момента возникновения пробоя. Исследования проводились методом бокового просвечивания области лазерного пробоя зондирующим пучком с последующим перестроением его изображения из плоскости пробоя на CCD-камеру [1, 2]. Для анализа изменений структуры пучка, прошедшего непосредственно через область пробоя, применялись различные режимы селекции зондирующего пучка.

---

\* Доклад на VII школе по лазерной физике. Москва, 18–20 июня 2013 г.

**Экспериментальный стенд, методика измерений и результаты**

Исследования проводились на стенде, состоящем из двух задающих генераторов с каскадами предусиления и системой диагностики параметров лазерного излучения. Первый задающий генератор (ЗГ-1) содержит активную среду YLF:Nd и работает в режиме активной модуляции добротности (модулятором служит внутрирезонаторная ячейка Поккельса). На выходе ЗГ-1 установлена вторая ячейка Поккельса, синхронизованная с внутрирезонаторной ячейкой и предназначенная для вырезания импульса длительностью 2 нс из импульса ЗГ-1. Энергия импульса на выходе вырезающей ячейки Поккельса  $\approx 1$  мДж. Тракт предусиления импульса излучения ЗГ-1 состоит из двух каскадов на основе кристаллов YLF:Nd ( $\varnothing 6$  и  $15$  мм), работающих в двухпроходном режиме усиления и позволяющих повысить энергию излучения до  $\approx 1,3$  Дж. С учетом потерь при транспортировке максимальная энергия пучка, при которой формировался лазерный пробой, составила  $\approx 1$  Дж – более чем достаточно в условиях проводимых исследований. Лазерный пробой формировался посредством пропускания пучка через плосковыпуклую линзу с фокусным расстоянием  $118$  см. Апертура пучка перед падением на линзу составляла  $4,8$  см. В качестве источника зондирующего излучения применялся задающий генератор ЗГ-2, который также работает в режиме активной модуляции добротности. На выходе ЗГ-2 был установлен двухпроходный усилительный каскад, повышающий энергию импульса до  $1-3$  мДж. Оптическая схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

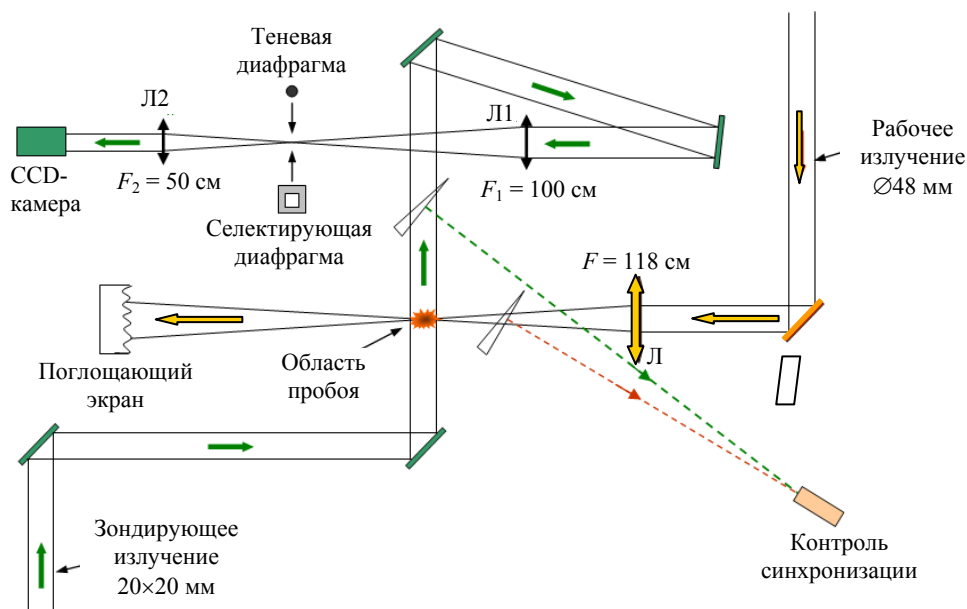


Рис. 1. Оптическая схема стенда регистрации параметров излучения при исследовании неоднородностей воздушной среды в области лазерного пробоя наносекундными импульсами

Изображение зондирующего излучения в плоскости формирования лазерного пробоя переинвертировалось посредством двукратно уменьшающего телескопа Кеплера (фокус линз  $F_1 = 100$  см,  $F_2 = 50$  см) на CCD-камеру (разрешение –  $1280 \times 1024$  пикселя; размер пикселя –  $6,7 \times 6,7$  мкм; оптический динамический диапазон –  $1000:1$ ). Анализ искажений зондирующего пучка после прохождения области лазерного пробоя осуществлялся посредством селекции излучения круглой те-

невой диафрагмой  $\varnothing 2$  мм и селективирующими диафрагмами размерами  $2 \times 2$  и  $4 \times 4$  мм. Экспериментально определена пороговая интенсивность излучения в области энергий 120–970 мДж и интенсивностей от  $5 \cdot 10^{11}$  до  $4 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Согласованная работа двух задающих генераторов и систем предусиления управлялась посредством многоканального генератора электрических импульсов, позволяющего контролировать временную стабильность следования импульсов с точностью  $\pm 5$  пс. Общая стабильность временной задержки лазерных импульсов относительно друг друга оценена авторами на уровне  $\leq 1$  нс. Частота следования импульсов рабочего и зондирующего излучений устанавливалась равной 1 Гц. Импульсы рабочего и зондирующего излучений посредством двух клиньев заводились на один фотодиод (5 ГГц) и осциллограф (500 МГц), обеспечивая таким образом контроль временного сдвига между импульсами.

На рис. 2 (см. также цвет. вкладку) представлены типичные изображения ближних зон зондирующего пучка при прохождении области лазерного пробоя без угловой селекции. Размер масштабной метки  $\perp$  на рисунках здесь и далее составляет  $3 \times 3$  мм.

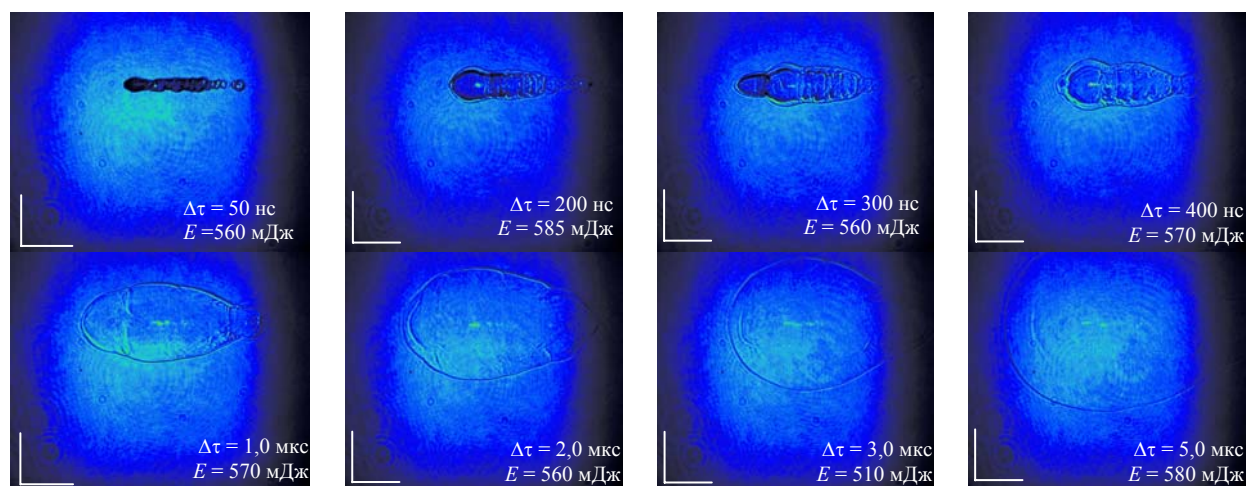


Рис. 2. Изменения изображения ближней зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя без угловой селекции

Зарегистрированные ближние зоны показывают, что лазерный пробой формирует в окружающем воздушном пространстве ударную волну, фронт которой хорошо заметен в пределах рассматриваемых времен задержки зондирующего излучения.

Проведен приближенный расчет изменения поперечного радиуса  $r$  ударной волны с течением времени  $t$ , позволивший оценить изменение скорости ударной волны, которая оказалась равной  $\approx 4,8$  км/с в интервале времени 50–100 нс и снизилась до  $\approx 600$  м/с в интервале времени от 4 до 5 мкс.

В серии экспериментов с применением селекции излучения посредством теневой диафрагмы она располагалась в общем фокусе линз Л1 и Л2 (см. рис. 1) и представляла собой шарик диаметром 2 мм, закрепленный на тонкой ( $\approx 0,15$  мм) проволоке. Теневая диафрагма задерживала все углы, находящиеся в диапазоне до  $2 \cdot 10^{-3}$  рад. Зарегистрированные ближние зоны зондирующего пучка представлены на рис. 3 (см. также цвет. вкладку).

Ближние зоны показывают, что зондирующее излучение наиболее искажает свою угловую направленность на фронте ударной волны. Кроме того, в диапазоне времени задержки  $< 2$  мкс из-

лучение также приобретает сильное угловое искажение всюду внутри границ ударной волны. На рис. 2, 3 в центре «сферы» фронта ударной волны присутствует несколько ярких точек, расположенных вдоль направления распространения рабочего излучения. Как выяснилось, данные точки присутствовали даже в случае полного перекрытия зондирующего излучения, т. е. они представляют собой самосвечение лазерной искры, возникающей в области пробоя. Посредством данных точек можно судить о структуре и протяженности лазерной искры в отдельных экспериментах.

Наибольший интерес данной работы, с точки зрения учета ее результатов при проектировании многопроходной схемы усиления, заключается в определении степени влияния последующей угловой селекции излучения, прошедшего через область лазерного пробоя, на результирующее распределение интенсивности.

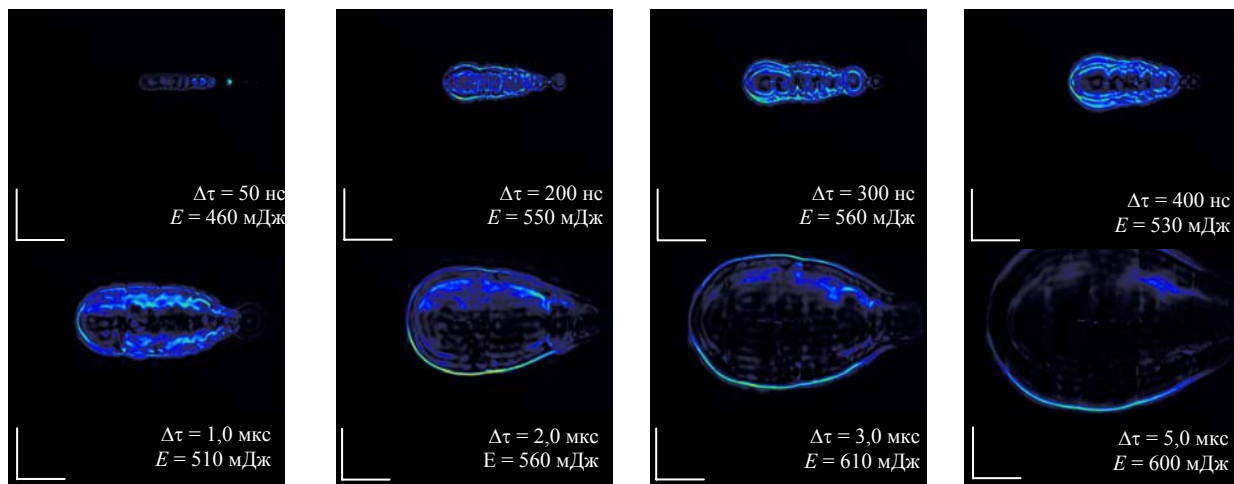


Рис. 3. Ближние зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя при селекции излучения теневой диафрагмой ( $\theta_{\text{сел}} = 2 \cdot 10^{-3}$  рад)

Проведена серия экспериментов по схеме рис. 1, в которых регистрировалась ближняя зона зондирующего пучка при проведении селекции излучения посредством квадратной диафрагмы размером  $2 \times 2$  мм, что в условиях оптической схемы стенда рис. 1 соответствует  $\theta_{\text{сел}} = 2 \cdot 10^{-3}$  рад. Зарегистрированные ближние зоны при различной временной задержке рабочего и зондирующего пучков представлены на рис. 4 (см. также цвет. вкладку).

Проведена серия экспериментов по схеме рис. 1, в которых регистрировалась ближняя зона зондирующего пучка при проведении селекции излучения посредством квадратной диафрагмы размером  $4 \times 4$  мм, что в условиях оптической схемы стенда рис. 1 соответствует  $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад. Зарегистрированные ближние зоны при различной временной задержке рабочего и зондирующего пучков представлены на рис. 5 (см. также цвет. вкладку).

Исследования показали, что наибольшее изменение угловой направленности претерпевают участки зондирующего пучка, прошедшие непосредственно через фронт ударной волны. При временах задержек  $\Delta\tau < 500$  нс селекция в рассмотренных углах приводит к полному локальному исчезновению интенсивности пучка, прошедшего через область, ограниченную фронтом ударной волны. При временах задержек  $\Delta\tau > 500$  нс провалы интенсивности уменьшаются, однако структура пучка сильно неоднородная. Наблюдаются возмущения интенсивности излучения вне области, ограниченной фронтом ударной волны, что может быть объяснено дифракцией излучения при прохождении фронта ударной волны.

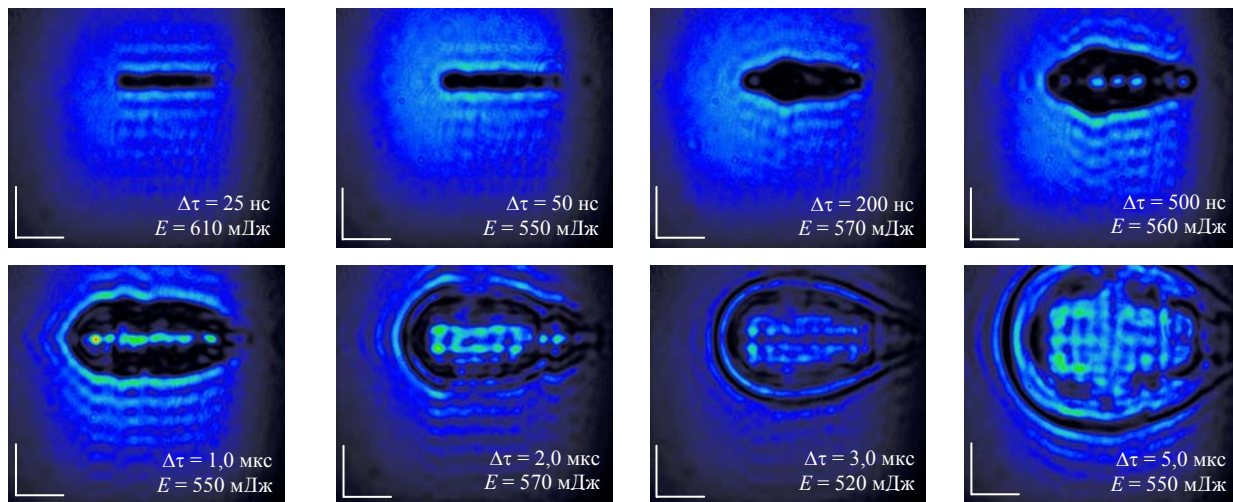


Рис. 4. Ближние зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя при селекции излучения селектирующей диафрагмой  $2 \times 2$  мм ( $\theta_{\text{сел}} = 2 \cdot 10^{-3}$  рад)

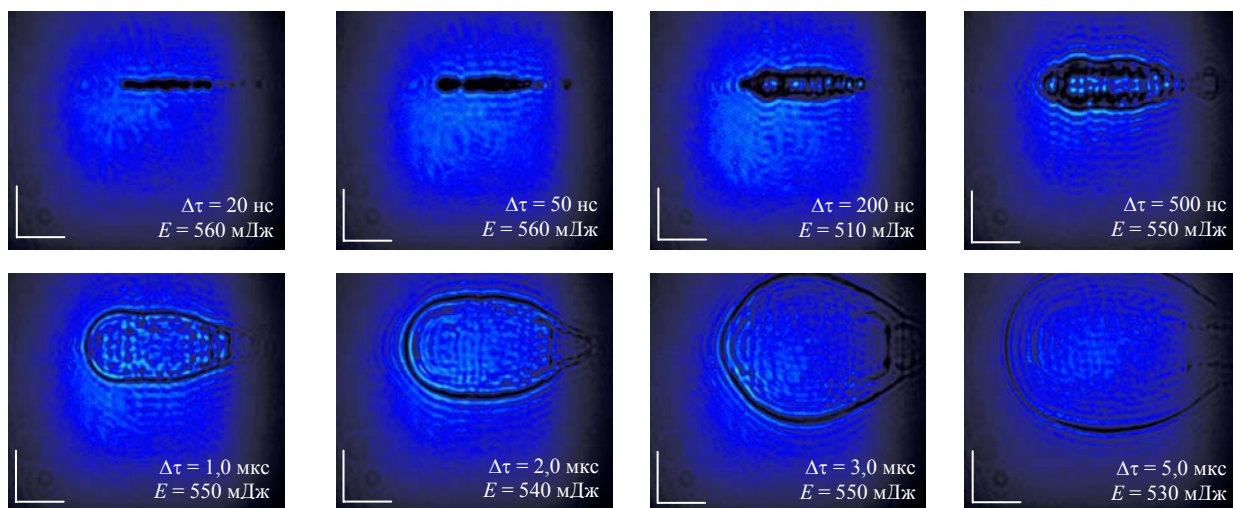


Рис. 5. Ближние зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя при селекции излучения селектирующей диафрагмой  $4 \times 4$  мм ( $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад)

Экспериментальные исследования, описанные в предыдущих разделах, проводились при энергиях импульсов рабочего излучения  $E \approx 500$  мДж, что более чем в 4 раза превышает пороговую энергию возникновения лазерного пробоя ( $\approx 120$  мДж). Были выполнены две серии экспериментов по регистрации ближней зоны зондирующего излучения, прошедшего через область лазерного пробоя, при энергиях рабочего излучения, близких к пороговой и значительно превышающих ( $\approx$  в 9 раз) пороговую. Селекция зондирующего излучения осуществлялась квадратной диафрагмой  $4 \times 4$  мм ( $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад).

Зарегистрированные ближние зоны зондирующего пучка при формировании лазерного пробоя рабочим излучением с энергией, близкой к пороговой, представлены на рис. 6 (см. также цвет. вкладку). Видно, что при меньших энергиях рабочего излучения область лазерного пробоя

располагается дальше по ходу следования пучка, а также укорачивается, что согласуется с классической теорией динамики развития лазерного пробоя [2]. Начиная со времени задержки  $\Delta\tau = 1,0$  мкс CCD камера и зондирующий пучок дважды передвигались с целью получения лучшей видимости точки пробоя в регистрируемой ближней зоне.

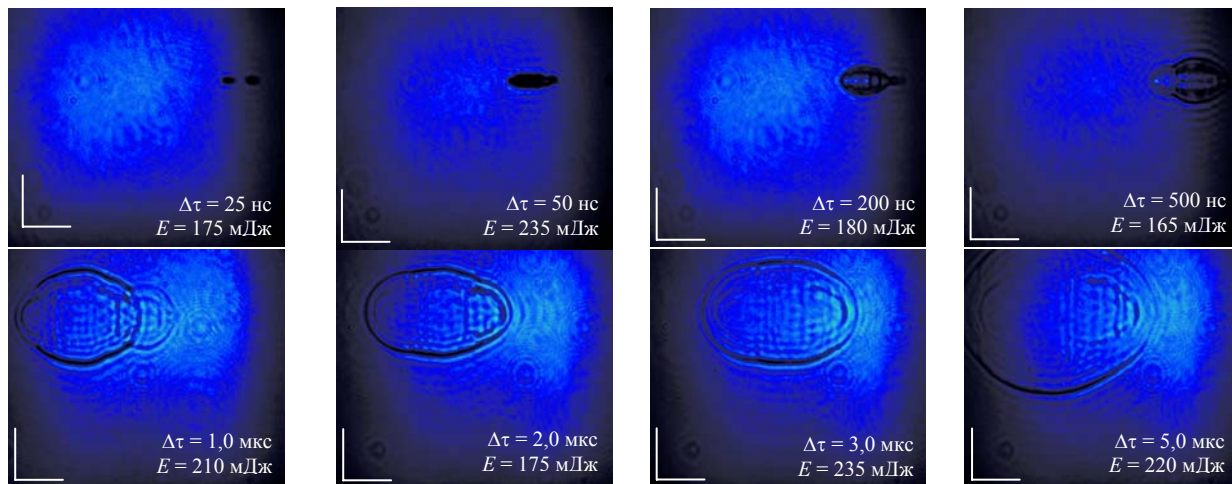


Рис. 6. Ближние зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя при пороговых значениях энергии рабочего излучения (селекция излучения диафрагмой  $4 \times 4$  мм,  $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад)

Регистрация ближних зон зондирующего пучка при энергиях рабочего излучения, значительно превышающих пороговую энергию, представлены на рис. 7 (см. также цвет. вкладку). Видно, что область лазерного пробоя при увеличении энергии излучения удлиняется вдоль направления распространения излучения, в результате чего форма огибающей фронта ударной волны становится более продолговатой, скорость распространения ударной волны в поперечном направлении становится больше, что можно объяснить увеличением энерговыделения в области пробоя.

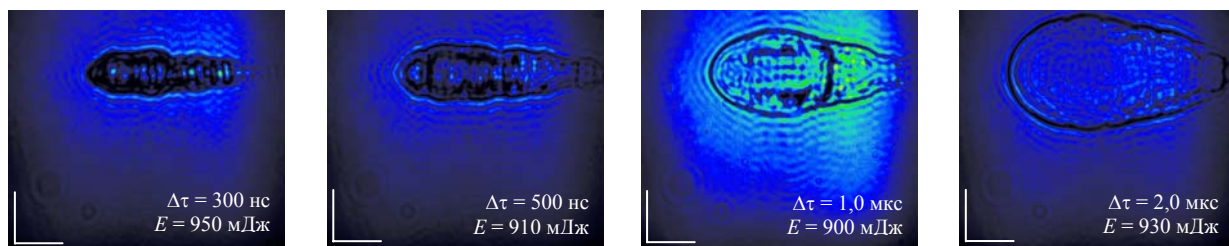


Рис. 7. Ближние зоны зондирующего пучка в плоскости лазерного пробоя при энергии рабочего излучения, значительно превышающей пороговую (селекция излучения диафрагмой  $4 \times 4$  мм,  $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад)

Результаты исследований искажений зондирующего пучка, прошедшего через область лазерного пробоя с временным запаздыванием до 5 мкс относительно момента возникновения пробоя, при формировании лазерного пробоя в условиях длительностей импульса рабочего излучения 1,2–2 нс, энергий 120–970 мДж и интенсивностях от  $5 \cdot 10^{11}$  до  $4 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> показывают, что в области лазерного пробоя воздуха, помимо лазерной искры, возникают неоднородности воздушной среды, приводящие к сильным искажениям угловой направленности зондирующего излучения.

Селекция зондирующего излучения теневой диафрагмой показала, что до момента времени  $< 2$  мкс после возникновения лазерного пробоя неоднородности воздушной среды носят сильно хаотический характер в области пространства  $\approx 4\text{--}5$  мм. При временах  $> 2$  мкс отчетливо формируется ударная волна, фронт которой наибольшим образом искажает угловую направленность проходящего через него зондирующего пучка.

Селекция зондирующего пучка квадратными диафрагмами ( $\theta_{\text{сел}} = 2 \cdot 10^{-3}$  рад и  $\theta_{\text{сел}} = 4 \cdot 10^{-3}$  рад) показала, что при временах  $< 500$  нс после возникновения пробоя в рассмотренных углах селекции наблюдается практически полное локальное исчезновение интенсивности зондирующего пучка. При временах задержек  $> 500$  нс провалы интенсивности уменьшаются, но структура пучка имеет неоднородный характер.

В течение времени  $\approx 0,9$  мкс, соответствующего максимальному временному интервалу прихода основного лазерного импульса излучения установки УФЛ-2М в точку тракта, где есть вероятность возникновения пробоя на одном из ранних проходов, масштаб области возникновения неоднородностей воздушной среды составляет  $\approx 4$  мм.

Для дальнейших расчетов формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка в тракте установки УФЛ-2М принято решение задавать сформированные вследствие лазерного пробоя области неоднородной воздушной среды в виде непрозрачных экранов, при прохождении которых излучение полностью теряет интенсивность.

## Список литературы

1. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение зарядов. – М.: Наука, 1974.
2. Mahdien M. H., Nikbakht M., Sobhani M. Shock wave driven by high intensity nanosecond laser pulse in atmospheric air and 2-D determination of refractive index variation of hot core air // Opt. Commun. 2011. Vol. 284. P. 4828–4835.

## Research into the Inhomogeneities of the Air in the Field of Laser Breakdown

B. G. Zimalin, I. N. Voronich, M. G. Kuzin, N. N. Rukavishnikov

*The experimental investigation of the inhomogeneities of the air, appearing in the area of laser breakdown in the air by nanosecond pulse, having energy up to 1J at intensities from  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> to  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> in the temporal range of 5 microseconds starting breakdown moment, has been conducted. An assessment of the scope and structure of the inhomogeneities of the air environment in the area of laser breakdown, which allows to account the influence of focusing partly reflected from the surface of the lens of the laser beams on the spatial profile of the laser beam in a high-power laser systems, such as UFL-2M, has been conducted.*