

С.П. Истомин, М.Ю. Свєрдлов

## ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОГО СЛЕДА МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Экспериментально исследован процесс образования теплового канала в результате взаимодействия сфокусированного луча  $\text{CO}_2$ -лазера с сажистым аэрозолем. С помощью интерферометра сдвига зарегистрирована динамика показателя преломления и температуры теплового канала. Получена зависимость температуры среды на оси луча от расстояния. Определено время развития свободной конвекции и время установления стационарного состояния процесса. По интерферограммам рассчитаны численные значения показателя преломления и температуры во всех точках области, занятой тепловым каналом, с использованием интегрального уравнения Абеля.

Взаимодействие мощного лазерного излучения с частицами аэрозоля сопровождается образованием температурных и газовых ореолов вокруг частиц, которые оказывают заметное влияние на характер распространения излучения [1, 2]. Самонаведенная лазерным излучением оптическая неоднородность в канале луча искажает его форму, а в случае распространения непрерывного пучка происходит смещение его вниз навстречу конвективному потоку [3].

При рассмотрении ряда вопросов по распространению мощного лазерного излучения в образовавшихся рефракционных каналах требуется знание различных характеристик каналов, в частности показателя преломления  $n$ . В работе [4] исследовано влияние показателя преломления на флуктуации фазы зондирующего пучка, в [3, 5] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения луча  $\text{CO}_2$ -лазера через сажистый аэрозоль с учетом наведенного поля показателя преломления.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального определения динамики показателя преломления и температуры теплового следа, образованного взаимодействием с сажистым аэрозолем сфокусированного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, распространяющегося горизонтально.

Измерение проводилось интерферометрически, что обеспечило непосредственное измерение поля показателя преломления. В опытах использовался интерферометр сдвига [6], который прост в сборке и настройке и позволяет непрерывно наблюдать изменяющуюся интерференционную картину. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Воздействующее излучение  $\text{CO}_2$ -лазера 2 типа ЛГ-25Б с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм фокусировалось соляной линзой 14 в центр аэрозольной камеры 8. Время срабатывания электромагнитного затвора 13 составляло 0,6 мс. Размеры и ход сфокусированного пучка  $\text{CO}_2$ -лазера в аэрозольной камере приведены на рис. 2 пунктирной линией. Измерение мощности  $P$  воздействующего излучения проводилось измерителем ИМО-2 16, расположенным после дискового ослабителя 15. Значение  $P$  в наших опытах равнялось 18 Вт, что составило значение интенсивности излучения  $I$  в точке перетяжки луча  $3,1 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

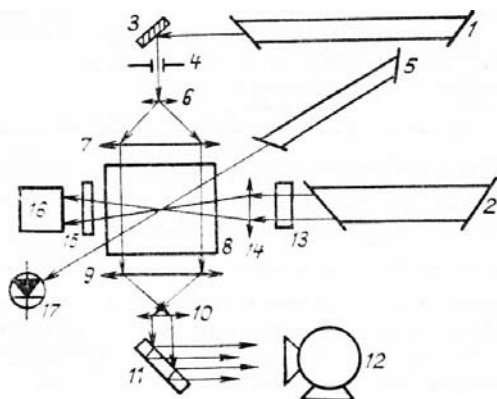
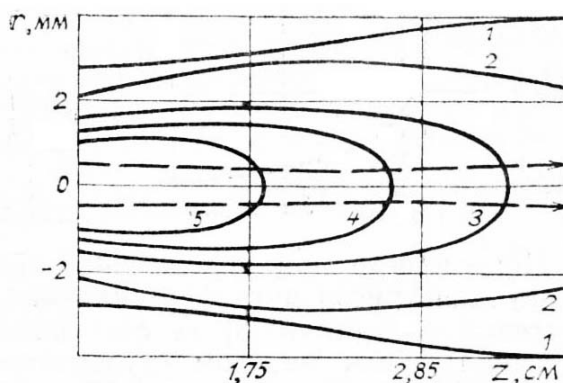


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Рис. 2. Карта изолиний  $n_{эф}$  и  $T_{эф}$ . Численные значения изолиний приведены в таблице

В качестве частиц аэрозоля использовалась сажа марки ИМ-100. Концентрация аэрозоля в камере длиной  $l = 5$  см составляла  $\sim 10^5$  см<sup>-3</sup> при среднем диаметре частиц  $\sim 9$  мкм. Показатель поглощения аэрозоля в камере оценивался с использованием закона Бугера — Ламберта — Бера по измеренному ослаблению излучения He — Ne-лазера 5 и составил  $\sim 0,03$  см<sup>-1</sup>.

Зондирующее излучение He–Ne-лазера 1 типа ЛГ-38 расширялось микрообъективом 6 и коллимировалось длиннофокусным объективом 7 до 8 см в диаметре с тем, чтобы полностью перекрыть исследуемую область в аэрозольной камере. Затем объективами 9, 10 и клиновидной стеклянной пластиной 11 направлялось в объектив кинокамеры 12 СКС-1М.

Таким образом, интерференционные картины возникновения и развития теплового поля последовательно записывались на киноплёнку. Интерференционная картина представляла собой интерферограммы в полосах конечной ширины [7]. Частота несущих полос в наших опытах составляла  $5\text{ см}^{-1}$ .

Полученные интерференционные кинограммы процесса указывают на то, что в начальный период взаимодействия тепловое поле обладает осевой симметрией. Это позволяет получить количественное распределение показателя преломления. Затем, за время  $\sim 20$  мс, развивается свободная конвекция. Спустя  $\sim 540$  мс процесс релаксируется и, несмотря на вынос частиц конвективными потоками и броуновское движение частиц, интерференционная картина не изменяется.

Численные значения показателя преломления были рассчитаны по интерферограмме, полученной спустя 10 мс от начала воздействия  $\text{CO}_2$ -лазера, при использовании интегрального уравнения Абея [7, 8]. На рис. 2 изображена карта изолиний теплового поля, направление оси  $z$  совпадает с направлением луча  $\text{CO}_2$ -лазера.

Согласно результатам [2] в качестве полученного распределения  $n$  следует рассматривать распределение эффективного показателя преломления среды  $n_{\text{эф}}$ , определяемого по усредненному теплосбору частиц в единице объема среды. То есть  $n_{\text{эф}}$  является усредненным значением сложным образом распределенного значения  $n$  в тепловом поле. Однозначная зависимость между значением  $n$  и температурой  $T$  [8] позволяет определять распределение усредненной температуры  $T_{\text{эф}}$ , значения которой приведены в таблице.

№ изолинии	$n_{\text{эф}}$	$T_{\text{эф}}$ , К
1	1,000265	293,0
2	1,000250	310,6
3	1,000225	345,0
4	1,000185	419,7
5	1,000145	535,5

Качественный анализ интерферограмм и интегральной фотографии канала сфокусированного луча  $\text{CO}_2$ -лазера показал, что в области, прилегающей к входному окну аэрозольной камеры, происходит сильное поглощение излучения, сопровождающееся ярким свечением. В этой области тепловыделение выше, чем в дальней области, и температура среды на оси луча достигает  $\sim 1100^\circ\text{K}$ .

Зависимость температуры среды от расстояния на оси луча спустя 15 мс от начала воздействия приведена на рис. 3. Сопоставление рис. 2, 3 указывает на то, что несмотря на сильное тепловыделение при входе в аэрозольное облако поперечный размер теплового поля на выходе превышает в 1,5–2 раза входной размер. Это обстоятельство объясняется сильной дефокусировкой луча  $\text{CO}_2$ -лазера в начальный момент процесса. Из рис. 2 также видно, что поперечный размер теплового поля значительно превышает диаметр воздействующего луча, поэтому в сечении, перпендикулярном направлению распространения излучения, значение температуры и показателя преломления можно считать постоянным.

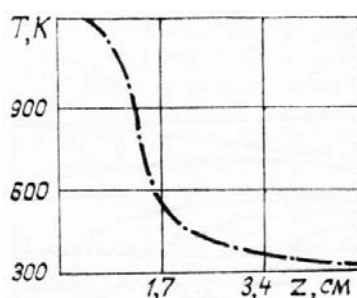


Рис. 3. Зависимость температуры среды  $T_{\text{эф}}$  на оси луча  $\text{CO}_2$ -лазера от расстояния от входного окна спустя 15 мс после начала процесса

Погрешность при определении  $n_{\text{эф}}$  обусловлены в основном точностью построения функции числа интерференционных полос [7], а также отклонением формы объекта от осевой симметрии [8] за счет конвекции. Ошибки при численном интегрировании уравнения Абея методом ступенчатой аппроксимации, который был использован в нашей работе, не превышают 0,5% вблизи оси симметрии фазового объекта по данным работы [8]. Суммарная погрешность составила  $\sim 5\%$ . Поэтому данным

методом можно успешно пользоваться при исследовании динамики параметров теплового поля мощного лазерного луча, распространяющегося в горячем аэрозоле.

Следует отметить, что в случае опытов при горизонтальном распространении луча получение количественных зависимостей затруднено, начиная со времени возникновения конвекции, так как форма исследуемого объекта усложняется. Но визуализация теплового поля позволяет изучать возникновение и установление конвективных потоков, образуемых тепловым самовоздействием лазерного луча.

1. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д. //Изв. вузов. Сер. Физика. 1977. № 11. С. 79.
2. Стрелков Г.М. //II Всесоюз. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде (Тезисы докл.). Обнинск, 1982. Ч. II. С. 157–159.
3. Грачев Ю.Н., Лоскутов В.С. //XV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. (Тезисы докл.). Алма-Ата, 1987. С. 383.
4. Беленький М.С., Лукин И.П., Миронов В.Л., Шелехов А.П. // VIII Всесоюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск, 1984. Ч. II. С. 37–40.
5. Грачев Ю.Н., Лоскутов В.С., Стрелков Г.М. //Распространение мощного оптического излучения в твердом аэрозоле. (Межвузовский сборник). Барнаул, 1982. С. 19–27.
6. Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте /Под ред. Г.И. Мишина. Л.: Наука, 1979. 232 с.
7. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
8. Аbruков В.С., Мальцев В.М. //Исследования процессов неустойчивого горения. (Межвузовский сборник). Чебоксары, 1984. С. 87–104.

Алтайский госуниверситет,  
Барнаул

Поступило в редакцию  
5 сентября 1989 г.

**S. P. Istomin, M. Yu. Sverdlov. The Diagnostics of an Intense Laser Beam Thermal Track.**

The process of a thermal channel generation due to the interaction of a CO<sub>2</sub>-laser focused beam with a soot aerosol was studied experimentally. Using the shift interferometer the dynamics of refraction index and temperature of the thermal channel was recorded. The dependence of the medium temperature on the beam axis on the distance was obtained. The times of free convection generation and of the relaxation process were determined. Using the interferograms the values of refraction index and temperature at all points of the region occupied by the thermal channel were calculated with the help of Abel's intergral equation.