

В.К. Пустовалов, И.А. Хорунжий

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ КОЛЬЦЕВОГО ПУЧКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТВЕРДОМ АЭРОЗОЛЕ

На основе численного решения системы уравнений на ЭВМ исследовано самовоздействие кольцевого пучка оптического излучения при распространении в твердом (металлическом) аэрозоле. Показана возможность самофокусировки пучка излучения, и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Нелинейное распространение интенсивного оптического излучения в атмосферном твердом аэрозоле экспериментально и теоретически исследовалось в [1, 2] (см. также список литературы). При этом особый интерес представляет рассмотрение тепловой самофокусировки пучка излучения в твердом аэрозоле. В [3] экспериментально показана возможность самофокусировки кольцевого пучка излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм в аэрозольной среде, состоящей из частиц алюминия. В данной статье проведено численное моделирование распространения кольцевого пучка излучения в металлическом аэрозоле в условиях, близких к условиям эксперимента [3].

Рассмотрим распространение кольцевого параллельного пучка излучения с $\lambda = 10,6$ мкм и распределением интенсивности

$$I = I_0 \exp[-(R - R_m)^2 / R_{\Pi}^2] \quad (1)$$

где $I_0 \approx 10^5$ Вт/см² — постоянная максимальная интенсивность излучения при значении радиуса $R_m = 0,5$ см; $R_{\Pi} = 0,25$ см — характерный радиус, вдоль оси X цилиндрической системы координат X, R в слое аэрозоля из монодисперсных частиц алюминия с размером ~ 6 мкм, массовой концентрацией $W \sim 1$ г/м³ и толщиной слоя $\Delta X = X_2 - X_1 \approx 1$ м, где X_1, X_2 — координаты передней и задней границ слоя аэрозоля. Данные параметры соответствуют средним значениям параметров аэрозоля и сфокусированного пучка излучения вблизи фокальной плоскости в эксперименте [3], поскольку именно в этой области с максимальной интенсивностью излучения развиваются процессы, определяющие возникновение самофокусировки пучка. Тепловое самовоздействие пучка излучения исследовалось на основе численного решения системы уравнений, сформулированной в [4] и включающей в себя параболическое уравнение квазиоптики с учетом реальных механизмов формирования поля, показателя преломления n_{λ} газовой среды (воздуха). Численные значения параметров задачи и температурные зависимости теплофизических величин, коэффициентов переноса и показателя преломления газовой среды для $\lambda = 10,6$ мкм взяты из [5–7].

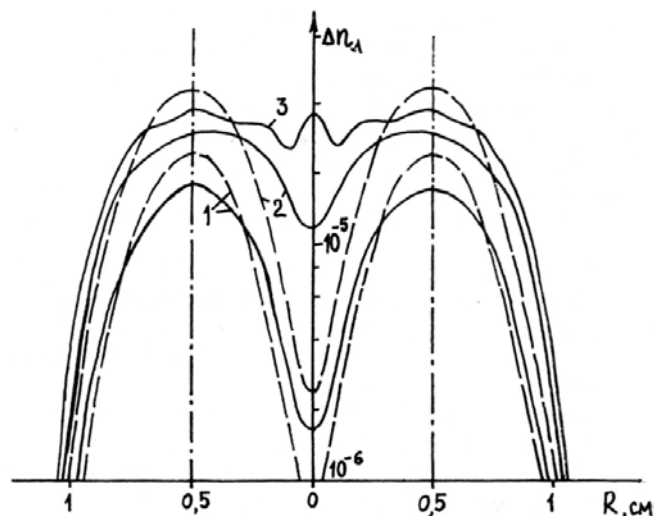


Рис. 1. Распределение изменения показателя преломления газовой среды Δn_{λ} по R при $X = X_1$ (---), $X = X_2$ (—) $t = 6 \cdot 10^{-3}$ (1), $1,2 \cdot 10^{-2}$ (2), $1,8 \cdot 10^{-2}$ с (3)

Как показывают результаты численных расчетов, в данном случае температура частиц при нагреве излучением не превышает $1,7 \cdot 10^3 \dots 1,8 \cdot 10^3$ К, и испарение частиц практически отсутствует [8]. Следовательно, вклад пара материала частиц в нагрев газа и изменение показателя преломления среды также отсутствуют. Энерговыведение в газе происходит за счет теплоотвода от частиц механизмов теплопроводности и молекулярного поглощения энергии излучения. При этом энерговыведение пропорционально местному значению интенсивности излучения, а образующийся профиль температуры газа будет качественно повторять профиль интенсивности излучения в данном сечении пучка, что с учетом зависимости показателя преломления n_λ от температуры газа T_c [5] приводит к формированию нестационарного двумерного поля показателя преломления аэродисперсной среды, которое, в свою очередь, определяет распространение пучка излучения.

На рис. 1 приведены распределения изменения показателя преломления среды $\Delta n_\lambda = n_\lambda - n_{\lambda 0}$, где n_λ , $n_{\lambda 0}$ — соответственно текущее и начальное значения показателя преломления газовой среды по R для двух сечений пучка при $X = X_1$ и $X = X_2$ и нескольких моментов времени. Вклад тепла за счет теплопроводности от нагретых частиц в нагрев газа достигает в среднем $\sim 96-98\%$ по сравнению с молекулярным поглощением, что обусловлено использованным значением массовой концентрации частиц W . Следовательно, частицы аэрозоля оказывают определяющее влияние на формирование полей температуры и показателя преломления газа. С момента начала действия излучения в приосевой области пучка с $R < R_m$ формируется фокусирующая линза. С течением времени (к моменту $t \sim 1,2 \cdot 10^{-2}$ с) это приводит к перераспределению интенсивности в сечении пучка, самофокусировке и образованию на оси пучка при $X = X_2$ пика интенсивности (рис. 2). Экспериментально определенное время развития самофокусировки в [3] составляет менее 0,1 с. При этом на периферии пучка при $R > R_m + R_n$ формируется дефокусирующая линза, немного расширяющая пучок излучения. Образование максимума интенсивности на оси пучка излучения с течением времени (к моменту $t = 1,8 \cdot 10^{-2}$ с) вызывает образование максимума температуры на оси и дефокусирующей линзе непосредственно вблизи от оси пучка при $X \leq X_2$ (рис. 1). Это приводит к снижению интенсивности на оси пучка. Кроме того, могут возникать временные осцилляции в распределении интенсивности излучения по сечению и оси пучка, которые обусловлены самовоздействием излучения на меняющемся со временем двумерном профиле показателя преломления среды. Отметим, что температура газа $\{T_c\}$ в отдельных пространственных областях пучка достигает примерно $350 \dots 400^\circ\text{К}$, что со временем приведет к влиянию теплопроводности на формирование профиля Δn_λ , а локальные изменения показателя преломления достигают $\Delta n_\lambda \sim -4 \cdot 10^{-5}$.

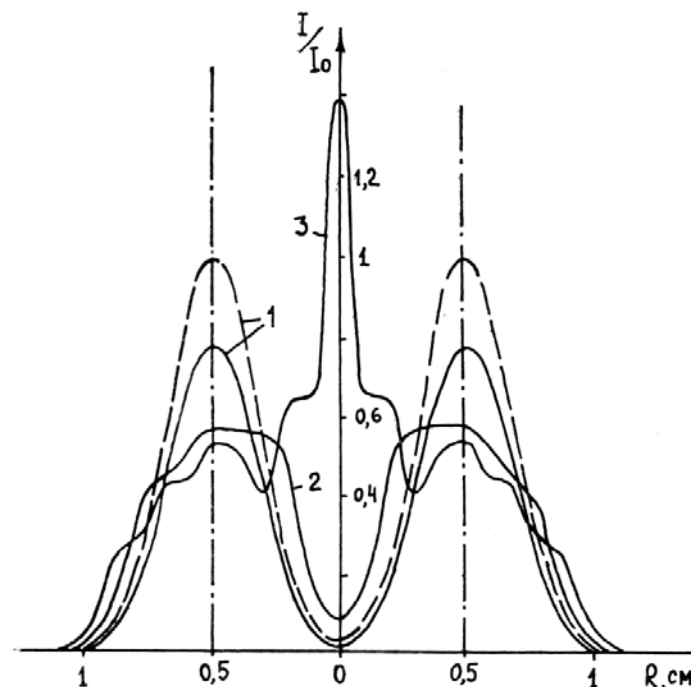


Рис. 2. Распределение нормированной интенсивности излучения I/I_0 по R при $X = X_1$ (----) $t \geq 0$ (1), $X = X_2$ (—), $t = 0$ (1), $6 \cdot 10^{-3}$ (2), $1,2 \cdot 10^{-2}$ с (3)

Таким образом, на основе численного моделирования подтверждается возможность перераспределения интенсивности в кольцевом пучке излучения при его распространении в металлическом аэрозоле, экспериментально установленную в [3]. При этом в [3] возникновение самофокусировки связы-

вается с разрушением частиц под действием излучения. На основании результатов проведенных расчетов можно говорить, что первопричина самофокусировки заключается в формировании соответствующего поля показателя преломления. Разрушение частиц может происходить в областях пучка, где в результате самофокусировки интенсивность излучения заметно превышает I_0 . Численные результаты показывают, что температура частиц может быстро достигать $T_0 \sim (3..5) \cdot 10^3$ К, и тем самым способствовать разрушению частиц.

1. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.
2. Зуев В.Е., Землянов А.А., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле. Новосибирск: Наука, 1984. 223 с.
3. Белов Н.Н., Дубровский В.Ю., Косырев Ф.К., Мотягин В.А., Негин А.Е., Иорданский М.А., Костромин В.Е. Нелинейное рассеяние и самофокусировка лазерного излучения в аэрозоле // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 8. С. 1741–1743.
4. Пустовалов В.К., Хорунжий И.А. Тепловые искажения пучка оптического излучения в просветляемом водном аэрозоле // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 42–49.
5. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере // Распространение радиоволн. М.: Наука, 1975. С. 5–45.
6. Свойства элементов / Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 536 с.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
8. Pustovalov V.R., Bobuchenko D.S. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. V. 32. № 1. P. 3–17.

Белорусский политехнический институт
Научно-техническое объединение «Политехник», Минск

Поступило в редакцию
7 декабря 1989 г.

V. K. Pustovalov, I. A. Khorunzhii. Self-Action of a Ring-Shaped Optical Beam Propagating Through Solid Aerosol.

The paper deals with the investigation of a ring-shaped optical beam self-action in solid (metal) aerosol, based on numerical computer solutions of the system of equations. It is shown that the beam self-focusing can occur, and calculational results are compared with experimental data.