

В.М. Сазанович, Р.Ш. Цвык

ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕЩЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования смещений энергетических центров изображения источника лазерного излучения, создающего рефракционный канал в поглощающей среде, и зондирующих пучков, распространяющихся в этом канале, в нестационарный (переходный) период воздействия. Расстояние между осями пучков варьировалось. Показано, что наиболее точно процесс смещения изображения источника воздействующего пучка по амплитуде описывает зондирующий пучок в наветренной части канала, по времени – в центральной. При $Re > 2$ процесс установления носит характер затухающих колебаний.

При распространении лазерного излучения на большие расстояния через атмосферу необходимо учитывать ряд факторов, приводящих к потере части энергии и искажению поперечной структуры лазерного пучка. К этим факторам относятся: поглощение излучения атмосферными газами, рассеяние аэрозолями, искажение амплитуды и фазы турбулентными неоднородностями, нелинейные эффекты, возникающие при распространении волны с достаточно большой энергией [1–3].

Эффективность работы систем, передающих энергию лазерного излучения, может быть повышена с помощью адаптивной оптики, позволяющей ослабить влияние атмосферных факторов за счет введения в исходное поле предискажений, учитывающих мгновенное распределение неоднородностей в канале распространения [4–5]. Для получения информации о структуре поля показателя преломления используются опорные (зондирующие) пучки, проходящие внутри канала распространения основной волны. Это могут быть либо пучки дополнительного источника, либо часть основного излучения, ответвленная для анализа искажений и управления адаптивной системой.

Из-за неоднородности распределения интенсивности в сечении воздействующего пучка искажения зондирующего зависят от положения его в канале распространения, поэтому встает вопрос о выборе зоны распространения зондирующего пучка, наиболее точно характеризующей канал в целом. В данной статье приводятся результаты одновременного измерения смещения энергетических центров изображения источников воздействующего и зондирующего пучков в процессе установления стационарного состояния поля показателя преломления в наведенном рефракционном канале при различном расположении осей пучков.

Поглощение излучения на трассе распространения приводит к нагреву канала и, следовательно, к дефокусировке пучка, а наличие ветра – к изменению распределения интенсивности и формы пучка в поперечном сечении и смещению энергетического центра пучка навстречу ветру [3]. Эти абберации простейшего типа вносят наибольший вклад в искажения пучка, но могут быть эффективно скорректированы с помощью управляемой оптики [6]. В среде с однородным поперечным ветром поворот фазового фронта волны происходит на угол [2]

$$\theta = \frac{dn}{dT} \frac{\alpha I_0 Z}{\rho C_p V},$$

где I_0 – характерная плотность мощности на входе в среду; α – коэффициент молекулярного поглощения; Z – длина трассы распространения; ρ , C_p – плотность и теплоемкость среды соответственно; V – скорость ветра; dn/dT – температурный градиент показателя преломления воздуха.

Из всей совокупности искажений выделить составляющую, соответствующую наклону фазового фронта, достаточно сложно, т.к. для этого необходимо измерять пространственные искажения фазового фронта по всей апертуре приемника в реальном масштабе времени. В [4] показано, что коррекцию наклона фазового фронта пучка можно проводить, измеряя вектор смещения центра тяжести изображения опорного источника, формируемого линзой,

$$\rho_{cF} = -\frac{F}{k \Sigma} \int_{\Sigma} \int d^2\rho \nabla_{\rho} S(Z, \rho),$$

где F – фокусное расстояние приемной линзы; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\Sigma = \pi R^2$ – площадь приемной линзы с радиусом R ; $S(\rho, Z)$ – флуктуации фазы на апертуре оптической системы. Смещения ρ_{cF} отнесенные к фокусному расстоянию, определяют угол наклона фазового фронта волны. Измерять же смещения изображения источника проще, чем смещения пучка как целого.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования смещения энергетических центров изображения источников воздействующего и зондирующего пучков проводились одновременно на модельной установке. Излучение лазера ЛГН-503 с длиной волны $\lambda_b = 0,488$ мкм и мощностью P до 1 Вт (воздействующее излучение) формируется системой линз в коллимированный пучок с эффективным радиусом $a_b = 0,4$ см, проходит через кювету, наполненную дистиллированной водой, подкрашенной водорастворимым красителем. Коэффициент поглощения жидкости $\alpha \sim 0,06$ см, длина кюветы 35 см, поперечный размер 25×25 см². Распределение интенсивности в сечении пучка определялось на входе в кювету сканированием точечным приемником в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Распределение – колоколообразное и от гауссовского отличается более плоской вершиной. Мощность воздействующего излучения периодически определялась серийным измерителем ИМО-2. Дополнительно проводился постоянный контроль мощности с помощью фотодиода, установленного в отраженный клином пучок. Электро-магнитный затвор для прерывания пучка установлен в фокусе первой линзы коллимирующей системы.

В качестве зондирующего использовался пучок одномодового лазера с $\lambda_3 = 0,63$ мкм и радиусом $a_3 = 0,1$ см, который с помощью оптического клина вводился в кювету параллельно воздействию пучку. Расстояние между осями пучков варьировалось от $+a_b$ до $-a_b$. Положения зондирующего пучка в сечении воздействующего показано на рис. 1. За кюветой пучки разделялись с помощью плоскопараллельной пластины и фильтров, выделяющих излучение с одной длиной волны. Изображение каждого из источников строилось отдельно с помощью объективов с фокусным расстоянием 1 м. В плоскости изображения (фокальной плоскости) устанавливались фотокатоды диссекторных систем, отслеживающих смещения фокального пятна по двум взаимно перпендикулярным координатам в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучков. Электрические сигналы, пропорциональные смещениям, анализировались с помощью цифрового запоминающего осциллографа С9-8.

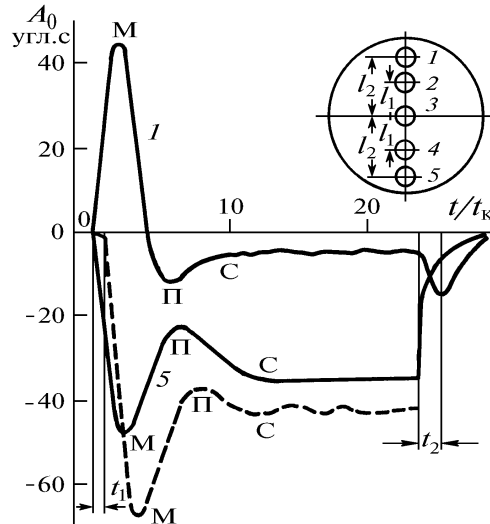


Рис. 1. Запись смещений воздействующего (штриховая линия) и зондирующих пучков (сплошные линии). В верхней части рисунка показано положение зондирующих пучков в сечении воздействующего, расстояния $l_1 = 2,8$ мм; $l_2 = 4$ мм

Для описания состояния среды в наведенном рефракционном канале использовались следующие параметры:

– параметр тепловыделения [7] $q = \frac{\alpha P \beta g a_b^3}{\pi v^3 \rho C_p} \simeq (4 \div 70)$;

– скорость конвективного потока, определяемая в вязких средах равновесием сил вязкости и плавучести [3],

$$V_k = \left(\frac{\beta g \alpha P a_b}{16 \rho C_p v} \right)^{1/2} \simeq (0,22 \div 0,92) \cdot 10^{-2} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} ;$$

– число Рейнольдса (Re), характеризующее соотношение сил плавучести и вязкости, число Пекле (Pe)– соотношение сил плавучести и термодиффузии

$$\text{Re} = (a_b V_k / v) \simeq (0,87 \div 3,7) ; \text{Pe} = (a_b V_k / \chi) \simeq (6,2 \div 26,4) ;$$

– характерная длина тепловой линзы [2] $L_t \simeq (180 \div 87)$ см, где β – температурный коэффициент расширения среды, g – ускорение свободного падения; v – вязкость среды; χ – теплопроводность среды.

Результаты эксперимента

Из приведенных выше оценок параметров состояния среды следует, что в условиях эксперимента силы плавучести превышают силы вязкости и термодиффузии. В этих условиях наличие временного сдвига между наведенным температурным полем и возникающей вследствие этого конвекцией приводит к тому, что процесс установления стационарного состояния в канале имеет неустойчивый характер [7]. Пример записи осциллограмм, получаемых в эксперименте, приведен на рис. 1. Штриховая кривая на этом рисунке – смещение центра тяжести изображения источника воздействующего пучка (в дальнейшем описания слова <центра тяжести изображения источника> для краткости будем опускать), сплошная кривая I – смещение зондирующего пучка, проходящего в крайнем верхнем положении над осью воздействующего, кривая S – зондирующий пучок под осью воздействующего.

Для адаптивных систем, использующих фазовую коррекцию, для сохранения структуры пучка необходимо знать не только детали динамики процесса, но и времена установления. Поэтому при анализе результатов, как и в работе [8], определялись величины смещений и времена достижения характерных точек процесса: A_m, t_m – максимальное смещение сигнала (М), A_n, t_n – точка перехода к стационарному состоянию (П), A_c, t_c – стационарное смещение (С), t_1 – время от начала воздействия до начала конвективного движения, t_2 – время от конца воздействия до момента переноса конвективным потоком области максимального нагрева через зондирующий пучок. Величины смещений на всех рисунках даны в угловых секундах, времена установления нормированы на время конвекции $t_k = a_b / U_k$.

Полученные результаты подтверждают вывод [8] о колебательном характере процесса установления стационарного состояния поля показателя преломления в образованном рефракционном канале. Это относится как ко всему каналу в целом (смещение воздействующего пучка), так и к отдельным участкам, которые анализируются зондирующими пучками. Во всех реализациях наблюдается практически мгновенное смещение зондирующих пучков с открытием затвора, смещение воздействующего начинается спустя некоторое время t_1 – время дефокусировки. В течение этого времени основную роль играют процессы дефокусировки пучка, а роль развивающегося конвективного потока, приводящего к рефракционным смещениям, незначительна. В нашем эксперименте это время уменьшается от значений $t_1/t_k \sim 1$ до 0,4 при увеличении числа Pe от 6 до 26.

На рис. 2 показаны величины смещений воздействующего пучка в трех характерных точках процесса, рассмотренных выше. Как видно из рисунка, если при малой мощности воздействующего излучения ($\text{Re} \sim 1$) процесс перехода в стационарное состояние гладкий (все три точки имеют примерно близкие значения смещений), то при $\text{Re} > 2$ размах между максималь-

ным смещением и смещением в переходной точке уже заметен и растет с увеличением числа Re . Отношение величины максимального смещения A_M к стационарному значению смещения A_c (штриховая кривая на рис. 2) стремится к постоянному значению $\sim 1,6$ при $Re > 3$.

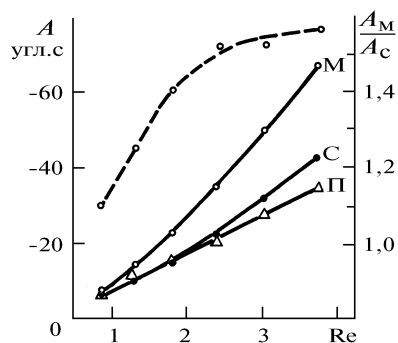


Рис. 2. Амплитуда смещения воздействующего пучка в максимуме (М, светлые кружки), в переходной точке процесса (П, треугольники) и в стационарном состоянии (С, темные кружки). Штриховая кривая – отношение A_M/A_c .

На рис. 3, *a, б* приведены зависимости величин максимальных (рис. 3, *a*) и стационарных (рис. 3, *б*) смещений зондирующего пучка, распространяющегося в разных зонах воздействующего, здесь же для сравнения штриховой линией показаны смещения воздействующего пучка. Как видно из рисунка, характер смещения зондирующих пучков, проходящих выше оси (с <подветренной> стороны) и ниже оси (с <наветренной> стороны) воздействующего пучка, в процессе установления стационарного состояния резко различаются. Если смещение <наветренных> пучков совпадает по направлению движения со смещением воздействующего пучка, то зондирующие пучки, проходящие с <подветренной> стороны канала, в начальный момент воздействия смещаются в сторону направления движения конвективного потока, достигают максимума, затем направление их движения меняется на противоположное, т.е. навстречу потоку. В стационарном состоянии (рис. 3, *б*) знак смещения таких зондирующих пучков зависит от их местоположения в канале и мощности воздействующего пучка, и для пучков, достаточно удаленных от оси, может быть положительным (в направлении конвективного потока).

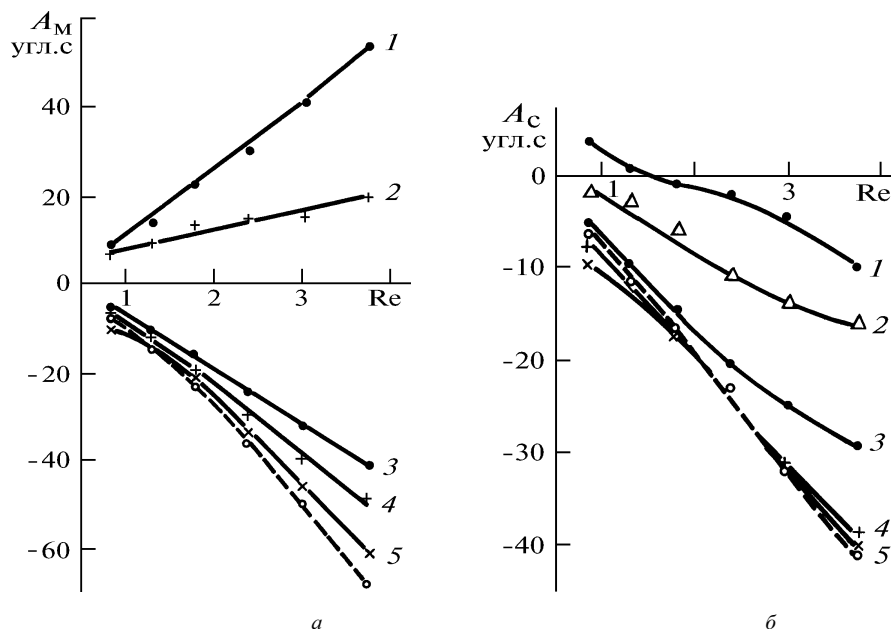


Рис. 3. Смещения зондирующих (сплошные линии) и воздействующего (штриховая линия) пучков в максимуме (*a*) и в стационарном состоянии процесса (*б*). Цифры у сплошных кривых обозначают положение зондирующих пучков в сечении воздействующего (см. рис. 1)

Наиболее близок к воздействию по величинам смещений в максимуме и в установившемся режимах зондирующий пучок, проходящий на расстоянии $0,7 a_b$ от центра канала с <наветренной> стороны. Смещения в максимуме зондирующего пучка, ось которого совпадает с осью воздействующего, меньше смещений последнего на $\sim 40\%$. В стационарном режиме эти расхождения сглаживаются.

Несколько иначе обстоит дело с временами достижения характерных точек. На рис. 4 показана зависимость от чисел Re и Pe времени установления максимального смещения (М) и переходной точки (П) для воздействующего (штриховая линия) и трех положений зондирующего пучка. По вертикальной оси отложено время, нормированное на время конвективного переноса $t_k = a_b / U_k$. Из рисунка следует, что время переходного процесса установления градиентов температуры крайне неодинаково в различных зонах прохождения зондирующих пучков. Наиболее <быстро> процесс установления происходит на периферии канала, а наилучшая корреляция с воздействующим пучком наблюдается у соосного зондирующего пучка. Максимальное отклонение воздействующего пучка при значениях числа $Re > 2$ достигается при $t \sim 3 t_k$, а при $Re < 2$ это время незначительно уменьшается с уменьшением Re .

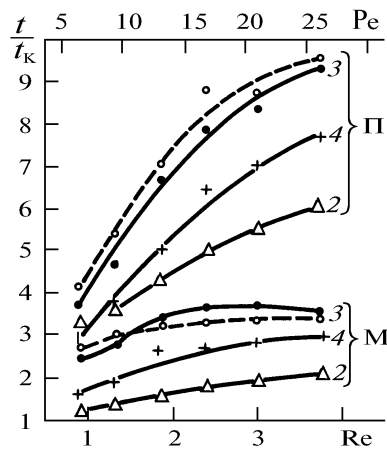


Рис. 4. Время достижения максимального смещения (М) и переходной точки (П) воздействующим пучком (штриховые кривые) и зондирующим пучками. Положение зондирующих пучков в сечении воздействующего то же, что и на рис. 3

Время установления стационарного состояния в канале сильно зависит от мощности воздействующего пучка. При малых мощностях (число $Re < 1,5$; число $Pe < 10$), когда переходный процесс <гладкий>, это время совпадает с временем установления максимального смещения, а при мощностях, соответствующих числам $Re > 2$, $Pe > 15$, наблюдается ярко выраженный колебательный характер переходного процесса, появляется второй период колебаний, стационарное состояние устанавливается при $t > 10 t_k$. Кроме того, при малых ($Re < 1,5$; $Pe < 10$) и при больших ($Re > 2$, $Pe > 15$) мощностях в стационарном состоянии наблюдаются небольшие по амплитуде колебания, которые, по-видимому, вызваны неустойчивостью канала.

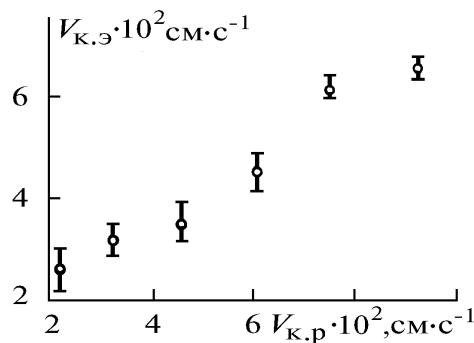


Рис. 5. Сравнение скорости конвекции, определенной из эксперимента – $V_{k,э}$ и рассчитанной по формуле – $V_{k,р}$

После окончания воздействия зондирующие пучки возвращаются в исходное состояние. Время выноса тепла в этом режиме определяется скоростью конвективного потока и его релаксацией во времени. Предполагая, что время t_2 (см. рис. 1) соответствует времени переноса незатухающим конвективным потоком максимально нагретой области через зондирующий пучок, были проведены оценки скорости конвективного потока по смещению зондирующего пучка в <подветренной> части канала (пучок 2). Расстояние между максимально нагретой областью и зондирующим пучком определялось из расстояния между осями с учетом их смещения. На рис. 5 приведены результаты сравнения вычисленной таким путем скорости со скоростью конвекции $U_{к.р}$, рассчитанной по формуле, приведенной выше.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– при мощностях воздействующего излучения, соответствующих числам $Re > 2$, переходный процесс смещения изображения воздействующего и зондирующего пучков имеет характер колебательного затухающего процесса, параметры которого зависят от поглощенной энергии и характеристик среды. Максимальная амплитуда смещений, нормированная на стационарное значение, стремится к некоторому постоянному значению;

– при значениях числа $Re < 1,5$ процесс установления стационарного состояния в канале <гладкий>, так как силы вязкости сравнимы с силами плавучести нагретой жидкости, время достижения стационарного состояния составляет $\sim 3 t_k$;

– время достижения максимального смещения воздействующего пучка при $Re > 2$ составляет $\sim 3 t_k$, время установления стационарного состояния возрастает с увеличением мощности и с появлением второго максимума достигает значений $\sim 10 t_k$ при $Re > 3$;

– поле показателя преломления в поперечном сечении канала неоднородно как по времени установления, так и по интегральному значению градиента, характер смещения зондирующего пучка с <наветренной> стороны канала аналогичен воздействующему, установление стационарного режима смещения пучков с <подветренной> стороны канала происходит в противофазе с воздействующим пучком;

– наиболее точно процесс смещения воздействующего пучка по амплитуде описывают зондирующие пучки в <наветренной> части канала, а по времени – в центральной.

1. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Землянов А.А. Нелинейная оптика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 255 с.
2. Воробьев В.В. Тепловое самовоздействие лазерного излучения в атмосфере. М.: Наука, 1987. 200 с.
3. Смит Д.К. // ТИИЭР. 1977. Т. 65. №12. С. 59–103
4. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 246 с.
5. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
6. Чертова И.А., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №2. С. 123–129.
7. Гордиенко В.М. Исследование тепловых самовоздействий излучения CO_2 -лазера в газовых средах. Дис. на соиск. степ. канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1976.
8. Ильин А.Б., Ларичев А.Р., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. // Оптика атмосферы и океана. Т. 5. №1. С 50–56.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
10 сентября 1993 г.

V.M. Sazanovich, R.Sh. Tsvyk. Investigation of the Laser Beam Energy Centers Displacements under Conditions of Thermal Blooming.

In this paper we present some results of experimental studies of displacements of the energy centers of images sources of laser radiation, which makes up a refraction channel in an absorbing medium, and of sounding beams that propagate through this channel. This particular study concerns the nonstationary (transient) phase of the interaction. In our study we have varied the distance between the beam axis. As a result, we show that most accurate (adequate) information about the amplitude of the displacement process (for the case of high-power radiation) can be obtained with a sounding beam propagating along a path in a windward portion of the beam while the information of the temporal behavior of the displacement process is more accurate if obtained with a sounding beam propagating along a path in the central part of the beam. It is also shown that at Reynolds number exceeding 2 the formation process is similar to damped oscillations.