

УДК 535.211, 538.93

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИИ НА ТЕРМОЛИНЗОВЫЙ ОТКЛИК В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ

Иванов В.И., Иванова Г.Д., Ливашвили А.И.

ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47), e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Метод тепловой линзы широко используется для исследования нелинейных сред и оптической диагностики материалов. Светоиндуцированная тепловая линза в однородной жидкости образуется в результате теплового расширения среды. В двухкомпонентной жидкости тепловой поток может вызывать концентрационный, обусловленный явлением термодиффузии (эффект Соре). Изменение концентрации поглощающей компоненты в жидкости в результате термодиффузии меняет величину и динамику термолинзового отклика среды. В данной работе проанализирована двумерная термодиффузия в двухкомпонентной жидкофазной среде в поле гауссова пучка излучения. Решение тепловой задачи проведено в тонкослойной геометрии ячейки, когда поперечный размер луча много больше длины (толщины) кюветы, что требует учета тепловых потоков только через окна оптической ячейки. В результате точного аналитического решения задачи в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика двухкомпонентной среды с учетом термолинзы в окнах кюветы. Полученные результаты актуальны для оптической диагностики дисперсных жидкофазных сред, в том числе термооптической спектроскопии.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, тепловая линза, термодиффузия

A THERMODIFFUSION INFLUENCE ON THE THERMAL LENS RESPONSE OF THE TWO-COMPONENT MEDIUM

Ivanov V.I., Ivanova G.D., Livashvily A.I.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Thermal lens technique is widely used to study nonlinear media and optical diagnostics of materials. The light-induced thermal lens in a homogeneous fluid is formed as a result of thermal expansion of a medium. In two-component fluid the heat flow also can cause concentration stream arising from occurrence of thermodiffusion (Soret effect). A change in the concentration of absorbing components in the liquid as a result of thermal diffusion changes the magnitude and dynamics of medium thermal lens response. This paper analysed the two-dimensional thermodiffusion in two-component in a Gaussian beam radiation field. A solution of the thermal task is carry out in thin-layer cells geometry when the beam transverse dimension is much more than cell lengths (thickness), that requires consideration of heat flow through window optical cells only. As a result of the exact analytical solution of the problem the expression for the two-component medium stationary thermal lens response is achieved, taking into account the thermal lens in the windows of the cell. The results are relevant to optical diagnostics of dispersed liquid environments, including the thermo-optical spectroscopy.

Keywords: radiation self-action, thermal lens, thermodiffusion.

Метод тепловой линзы широко используется в термооптической спектрометрии, в оптической диагностике материалов [8–10]. В жидких двухкомпонентных средах термолинзовый отклик имеет свои особенности, поскольку, кроме обычного теплового отклика, связанного с тепловым расширением среды, здесь могут возникать концентрационные потоки, обусловленные явлением термодиффузии (эффекта Соре) [1–7]. При этом перераспределение концентрации компонент в неоднородном световом поле приводит к соответствующему изменению показателя преломления (и поглощения) среды.

В работе [2] предложена новая схема термолинзовой ячейки с тонкослойной кюветой, толщина которой значительно меньше размера светового пучка. При этом тепловая задача

решается с учетом только потоков через окна кюветы. Для двухкомпонентной среды при расчете светоиндуцированной линзы дополнительно необходим учет радиальных концентрационных потоков.

Цель исследования

В данной работе теоретически исследован стационарный термолинзовый отклик двухкомпонентной жидкофазной среды в тонкослойной кювете.

Рассмотрим однолучевую схему измерения термолинзового сигнала (рис. 1). Пусть двухкомпонентная жидкофазная среда, коэффициент поглощения которой α целиком определяется одним компонентом с массовой концентрацией C ($\alpha = \beta C$, где $\beta = (\partial \alpha / \partial C)$ – константа среды), находится в тонкой кювете толщиной d_0 .

Для нахождения параметров тепловой линзы рассмотрим тепловую задачу нагрева среды лазерным пучком. Считая, что для малых толщин слоя среды d и окна кюветы L (при $d, L \ll r_1$) можно пренебречь радиальным (вдоль r) тепловым потоком, получаем из одномерную тепловую задачу:

$$c_m \rho_m \partial T_m / \partial t = -\chi_m \partial^2 T_m / \partial z^2 + \alpha I(r, z), \quad (1)$$

где c_m, ρ_m — удельные теплоемкость и плотность среды, T_m — температура среды, χ_m — коэффициент теплопроводности среды, $I(r, z)$ — интенсивность падающего излучения (считаем поглощение малым ($\alpha d_0 \ll 1$)).

Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости, перпендикулярной оптической оси z :

$$I = I_0 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2 \right)^{-1} \exp(-r^2(z)/r_1^2(z)), \quad (2)$$

где $r_1(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2}$ — радиус пучка на расстоянии z от перетяжки, r — расстояние от

оси пучка, λ — длина волны излучения, r_0 — радиус пучка в перетяжке, I_0 — интенсивность излучения на оси в плоскости перетяжки пучка.

Аналогично рассматривается тепловая задача для температуры в окне кюветы T_w :

$$c_w \rho_w \partial T_w / \partial t = -\chi_w \partial^2 T_w / \partial z^2, \quad (3)$$

где c_w, ρ_w, χ_w — теплофизические параметры материала окна.

Границные условия на границе кювета-воздух соответствуют, например, конвективному теплообмену:

$$\chi_w (\partial T_w / \partial z)_{z=L+d/2} = \gamma (T_e - T_0). \quad (4)$$

где γ, T_0 — соответственно коэффициент конвективного теплообмена и температура внешней среды, $T_e = T_w(L + d/2)$. На границе раздела среда кювета имеем условия равенства температур и тепловых потоков:

$$T_m(d/2) = T_w(d/2). \quad (5)$$

$$\chi_m(\partial T_m / \partial z)_{z=d/2} = \chi_w(\partial T_w / \partial z)_{z=d/2}. \quad (6)$$

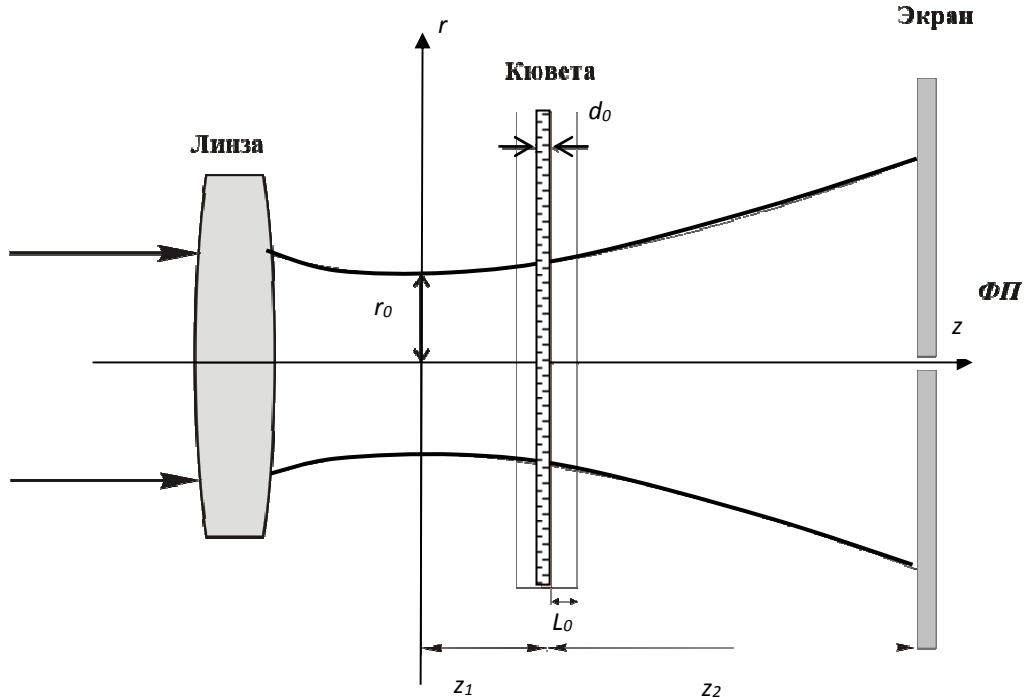


Рис. 1. К расчету термолинзового отклика среды в тонкослойной цилиндрической кювете

В стационарном режиме имеем следующие решения системы (1–6) для распределения

температур в среде T_m^s и окне кюветы T_w^s :

$$T_m^s = T_0 + T(d/2) + \alpha I(r) \chi_m^{-1} \left\{ (d/2)^2 - z^2 \right\}, \quad (7)$$

$$T_w^s = T_0 + T(d/2) + \alpha d I(r) \chi_w^{-1} \left\{ (d/2) - z \right\}, \quad (8)$$

$$T(d/2) = \alpha I(r) d \left(\gamma^{-1} - L \chi_w^{-1} \right). \quad (9)$$

Теперь учтем влияние термодиффузии. Поскольку диффузионные процессы намного порядков медленнее, чем процессы теплопереноса, можем считать, что термодиффузия поглощающей компоненты происходит в квазистационарном температурном поле, которое определяется формулами (7–9), но уже с зависящим от концентрации коэффициентом

поглощения.

Систему балансных уравнений для концентрации C поглощающих частиц запишем следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla J, \quad (10)$$

$$J = -D_{21}C\nabla_r T - D_{22}\nabla_r C, \quad (11)$$

где: J — концентрационный поток, D_{22} — коэффициент диффузии поглощающих частиц, D_{21} — коэффициент термодиффузии. Для толщин слоя $d_0 \ll L$ можем пренебречь изменением температуры в слое среды по толщине кюветы и принять ее равной $T(r, z=0)$. В установившемся режиме ($(\partial C / \partial t) = 0$) из (10–11) имеем для стационарного значения концентрации C :

$$-D_{21}C\nabla_r T - D_{22}\nabla_r C = 0, \quad (12)$$

Считая изменение концентрации поглощающей компоненты малым по сравнению с начальным, имеем $C_1 = C - C_0$, где $C_1 \ll C_0$. Тогда из (12) с учетом (8) получаем линеаризованное уравнение по C_1 :

$$-\Delta_{thd}C_0\nabla_r I - \nabla_r C_1 = 0, \quad (13)$$

где: $\Delta_{thd} = \alpha_0 d(L\chi_0^{-1} + \gamma^{-1} + d\chi_c^{-1}/2)D_{21}D_{22}^{-1}$, $\alpha_0 = \beta C_0$.

Из (13) получаем:

$$C_1 = -C_0\Delta_{thd}I_0. \quad (14)$$

Для расчета термолинзового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [10]:

$$\Theta = 1 - \frac{2(z_1/l_0)\Phi_n(0)}{(1+z_1^2/l_0^2)(1+3z_1^2/l_0^2)}, \quad (15)$$

где $l_0 = \pi r_0^2 / \lambda$, $\Phi_n(0)$ — нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка.

Последний включает два вклада, обусловленных термолинзой в слое среды и в окнах кюветы:

$$\Delta\Phi_{nl}^m(0) = 2k \int_0^{d/2} \left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right) \Delta T_m^s(z, r=0) dz . \quad (16)$$

$$\Delta\Phi_{nl}^w(0) = 2k \int_{d/2}^{(d/2+L)} \left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right) \Delta T_w^s(z, r=0) dz , \quad (17)$$

где $\left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right)$ и $\left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right)$ постоянные коэффициенты для нелинейной среды и материала окна соответственно, $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор излучения.

Используя (15–17), получаем:

$$\Delta\Phi_{nl}^m(0) = \alpha_0 k I_0 d^2 \left\{ \gamma^{-1} - L \chi_w^{-1} + d \chi_m^{-1} / 6 \right\} \left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right) (1 - \Delta_{thd} I_0) . \quad (18)$$

$$\Delta\Phi_{nl}^w(0) = \alpha_0 k I_0 d L \left\{ \gamma^{-1} - L \chi_w^{-1} + \chi_m^{-1} (L + d) \right\} \left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right) (1 - \Delta_{thd} I_0) . \quad (19)$$

Окончательно для стационарного значения линзовой прозрачности кюветы имеем выражение:

$$\Theta(t=\infty) = 1 - \frac{2(z_1/l_0) [\Delta\Phi_{nl}^m(0) + \Delta\Phi_{nl}^w(0)]}{\left(1 + z_1^2/l_0^2\right) \left(1 + 3z_1^2/l_0^2\right)} . \quad (20)$$

Полученное выражение позволяет рассчитать влияние термодиффузии на величину стационарного термолинзового отклика тонкослойной оптической ячейки с двухкомпонентной средой.

Выводы

Таким образом, показано, что термолинзовый отклик в двухкомпонентной среде содержит дополнительный вклад, обусловленный термодиффузионным изменением концентрации поглощающей компоненты. Величина этого вклада может быть достаточно большой и иметь разный знак для разных сред в зависимости от знака коэффициента термодиффузии. Также на величину стационарного термолинзового отклика будет влиять и изменение пропускания слоя среды. Таким образом, самоиндукционную модуляцию коэффициента поглощения необходимо учитывать при анализе данных в термолинзовой спектроскопии многокомпонентных сред [1–3]. Полученные выражения могут быть использованы при экспериментальном определении величин коэффициентов тепломассопереноса в многокомпонентных жидкофазных средах [5–8].

Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик жидкофазной дисперсной среды// Физико-химические аспекты изучения кластеров,

- наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В. М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. — С. 112–115.
2. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкокфазной среде// Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.
3. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Электрострикционный механизм самовоздействия излучения в жидкости с наночастицами// Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. — 2009. — Т. 4. — № 2. — С. 58–60.
4. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. — 105 с.
5. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Том 51. — № 3. – С. 50–53.
6. Иванов В.И., Окишев К.Н., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм просветления двухкомпонентной среды лазерным излучением // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 2. — С. 39–42.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкокфазной среде в поле гауссова пучка // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В. М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. — С. 116–119.
8. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости// Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В. М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. – Вып. 6. — С. 227–230.
9. Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм нелинейного поглощения суспензии наночастиц / К.Н. Окишев, В.И. Иванов, С.В. Климентьев, А.А Кузин, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 2. – С. 106–107.
10. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соросовский образовательный журнал. – 1996. — № 5. — С. 85–92.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск;
Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, проректор по учебной работе

ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения
Министерства транспорта РФ» , г. Хабаровск.