

ТЕПЛОВОЕ САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОНКОСЛОЙНОЙ ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЕ

Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К.

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. В стандартной схеме светоиндуцированная тепловая линза рассчитывается при учете только радиального теплового потока, что применимо для толстой кюветы, когда поперечный размер луча много меньше длины (толщины) кюветы. В данной работе предлагается новая схема с тонкослойной кюветой, толщина которой значительно меньше размера светового пучка. Данная схема предпочтительнее для максимальной миниатюризации оптической ячейки, размеры которой могут составлять микрометры. Последнее особенно актуально для жидкофазных сред, поскольку в таких кюветках существенно ослаблено влияние конвекции на процесс измерения. Решение тепловой задачи в тонкослойной геометрии требует учета тепловых потоков через окна ячейки. В результате точного аналитического решения задачи в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика среды с учетом термолинзы в окнах кюветы. Полученные результаты актуальны для оптической диагностики дисперсных жидкофазных сред, в т.ч. термооптической спектроскопии.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, тепловая линза, оптическая нелинейность.

THE RADIATION THERMAL SELF-ACTION IN A THIN LIQUID MEDIUM

Ivanov V.I., Ivanova G.D., S.I. Khe V.K.

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 is calculated in the standard scheme taking into account only the radial heat flux that is applicable for the thick cells, when beam transverse dimension is much smaller than cell lengths (thickness). This paper proposes a new scheme with a thin layer of cell thickness which is significantly less than the size of the beam. This scheme is preferred for maximum miniaturization optical cell which can be micrometers of size. This is particularly important for liquid media, because such cell significantly reduces the effect of convection on the measurement process. A solution of the thermal task in applying geometry requires consideration of heat flow through the cell window. As a result of the exact analytical solution of the problem the expression for the stationary thermal lens medium 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, optical nonlinearity.

Светоиндуцированная линза часто используется для исследования нелинейно-оптических свойств сред, а также в различных методах оптической диагностики материалов [1-8]. Наиболее детально разработан метод тепловой линзы, достаточно давно применяемый в термооптической спектрометрии [1-3]. Образованная лазерным пучком в среде линза увеличивает расходимость формирующего ее пучка (или пробного – в двухлучевой схеме), что регистрируется фотоприемником. Обычно в стандартной схеме тепловая задача рассчитывается при учете только радиального теплового потока, что применимо для толстой кюветы, когда поперечный размер луча много меньше длины (толщины) кюветы. Однако в ряде случаев возникает необходимость исследования тонкопленочных образцов. Такие задачи могут быть обусловлены, например, интегрально-оптическим исполнением экспериментальной схемы (с целью миниатюризации измерительной ячейки).

Цель исследования

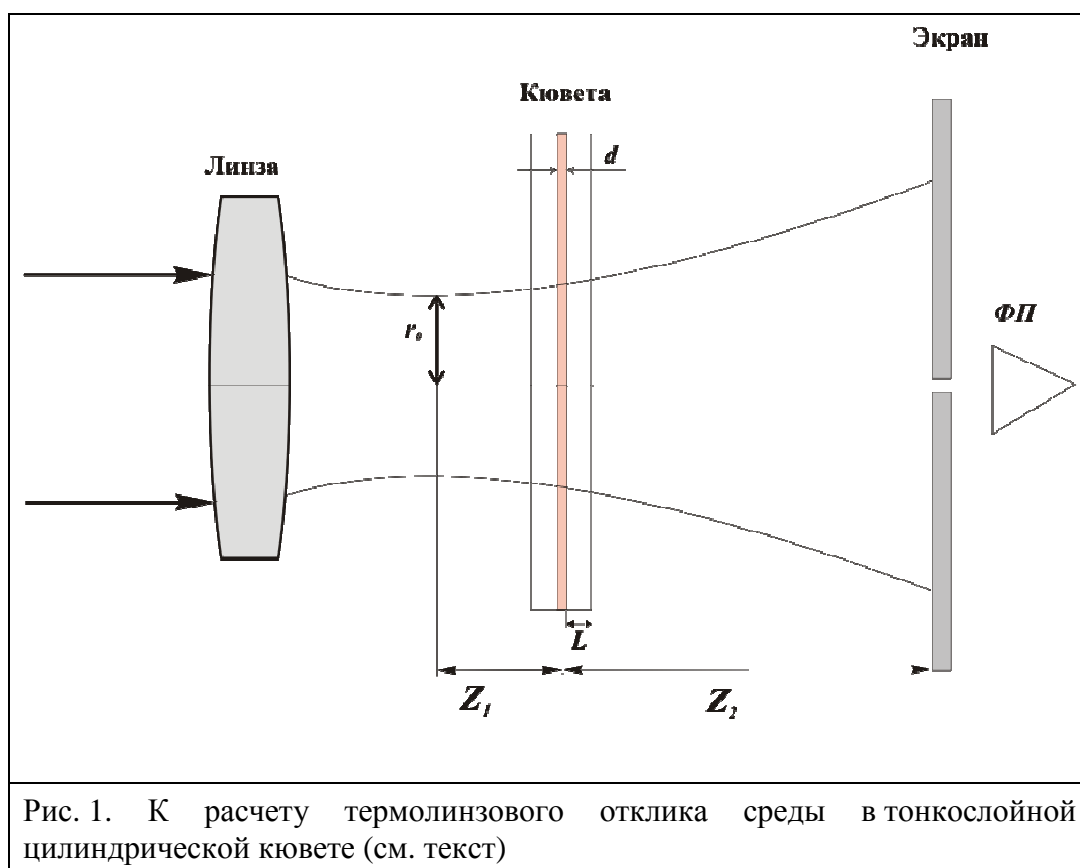
В данной работе теоретически исследовано тепловое самовоздействие (термолинзовый отклик) гауссова пучка излучения в тонкослойной кювете.

Рассмотрим однолучевую схему измерения термолинзового сигнала (рис. 1). Пусть среда с коэффициентом поглощения α находится в тонкой кювете толщиной d . Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости, перпендикулярной оптической оси z :

$$I = I_0 \exp(-r^2(z)/r_1^2(z)), \quad (1)$$

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.



Термолинзовый сигнал определяется изменением приосевой интенсивности излучения за экраном

$$\theta_c(t) = \frac{I(t) - I(0)}{I(0)}. \quad (2)$$

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

$$c_m \rho_m \partial T_m / \partial t = -\chi_m \partial^2 T_m / \partial z^2 + \alpha I_0 \exp(-r^2 / r_1^2(z_1)), \quad (3)$$

где c_m, ρ_m – удельные теплоемкость и плотность среды, T_m – температура среды, χ_m – коэффициент теплопроводности среды.

Аналогично рассматривается тепловая задача для температуры в окне кюветы T_w :

$$c_w \rho_w \partial T_w / \partial t = -\chi_w \partial^2 T_w / \partial z^2, \quad (4)$$

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

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

$$\chi_w (\partial T_w / \partial z)_{z=L+d/2} = \gamma (T_e - T_0). \quad (5)$$

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:

$$T_m(d/2) = T_w(d/2). \quad (6)$$

$$\chi_m (\partial T_m / \partial z)_{z=d/2} = \chi_w (\partial T_w / \partial z)_{z=d/2}. \quad (7)$$

В стационарном режиме имеем следующие решения системы (3–7) для распределения температур в среде T_m^s и окне кюветы T_w^s :

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

$$T_w^s = T_0 + T(d/2) + \alpha d I(r) \chi_w^{-1} \left\{ (d/2) - z \right\}, \quad (9)$$

$$T(d/2) = \alpha I(r) d \left(\gamma^{-1} - L \chi_w^{-1} \right). \quad (10)$$

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

$$T = 1 - \frac{2(z_1/l_0) \Phi_n(0)}{(1 + z_1^2/l_0^2)(1 + 3z_1^2/l_0^2)} \quad (11)$$

(9)

где $l_0 = \pi r_0^2 / \lambda$, $\Phi_{nl}(0)$ – нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка.

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

$$\Delta \Phi_{nl}^m(0) = 2 \int_0^{d/2} \left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right) \Delta T_m^s(z, r=0) dz. \quad (12)$$

$$\Delta\Phi_{nl}^w(0) = 2 \int_{d/2}^{(d/2+L)} \left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right) \Delta T_w^s(z, r=0) dz, \quad (13)$$

где $\left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right)$ и $\left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right)$ постоянные для нелинейной среды и материала окна соответственно.

Используя (9–11), получаем:

$$\Delta\Phi_{nl}^m(0) = \alpha I_0 d^2 \{ \gamma^{-1} - L\chi_w^{-1} + d\chi_m^{-1} / 6 \} \left(\frac{\partial n_m}{\partial T} \right). \quad (12)$$

$$\Delta\Phi_{nl}^w(0) = \alpha I_0 dL \{ \gamma^{-1} - L\chi_w^{-1} + \chi_m^{-1}(L+d) \} \left(\frac{\partial n_w}{\partial T} \right) \alpha I_0 \quad (13)$$

Окончательно для стационарного термолинзового сигнала имеем выражение:

$$\theta_c(t = \infty) = \frac{2(z_1/l_0) [\Delta\Phi_{nl}^m(0) + \Delta\Phi_{nl}^w(0)]}{(1 + z_1^2/l_0^2)(1 + 3z_1^2/l_0^2)}. \quad (14)$$

Полученное выражение показывает влияние на величину отклика как теплофизических параметров среды и материала кюветы, так и геометрических размеров оптической ячейки, жидкостью.

Выводы

В данной работе предлагается новая схема термолинзового эксперимента с тонкослойной кюветой, толщина которой значительно меньше размера светового пучка. В результате точного аналитического решения тепловой задачи в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика среды с учетом термолинзы в окнах кюветы. Применение данной схемы предпочтительнее для микрокювет с жидкофазными средами, поскольку в таких кюветах существенно ослаблено влияние конвекции на процесс измерения. Полученные результаты актуальны для нелинейной оптики дисперсных жидкофазных сред [6–9], а также для оптической диагностики таких сред (в т.ч. термооптической спектроскопии) [3].

Список литературы

1. Доронин И.С., Иванова Г.Д., Кузин А.А., Окишев К. Н. Термодиффузия наночастиц в жидкости // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6-2. – С. 238-242.
2. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик жидкофазной дисперсной // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 112-115.
3. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Термолинзовая спектроскопия двухкомпонентных жидкофазных сред // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2011. – № 4.

– С. 039-042.

4. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И. Термоиндуцированное самовоздействие гауссова пучка излучения в жидкой дисперсной среде // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5. – № 1. – С. 5-8.
5. 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.
6. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 50-53.
7. Иванов В.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентной среде // Письма в «Журнал технической физики». – 2006. – Т. 32. – № 22. – С. 22-25.
8. Иванова Г.Д., Кирюшина С. И., Кузин А.А. Исследование явлений массопереноса в бинарных средах термографическим методом // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL: www.science-education.ru/116-12579.
9. Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В. Динамические голограммы в жидкофазной дисперсной среде // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-10. – С. 2164-2168.
10. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 5. – С. 85-92.

Рецензенты:

Крылов В.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный гуманитарный университет, г. Хабаровск;

Жуков Е.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Электроника и электротехника» ФГБОУ ВПО Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск.