



УДК 535.211

© В. И. Иванов, Г. Д. Иванова, В. К. Хе, 2011

ТЕРМОЛИНЗОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОФАЗНЫХ СРЕД

Иванов В. И. – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой «Теоретическая механика», тел. (4212) 40-73-76, e-mail: ivanov@festu.khv.ru; *Иванова Г. Д.* – преп. кафедры «Теоретическая механика», тел. (4212) 40-73-76; *Хе В. К.* – преп. кафедры «Физика», тел. (4212) 40-76-14, e-mail: khe@ngs.ru; (ДВГУПС)

Проанализирован стационарный термолинзовый отклик в тонкослойной двухкомпонентной среде. Показано, что термодиффузия может сильно влиять на величину тепловой линзы и коэффициент пропускания среды.

The stationary thermal lens response in thin layer of two component medium is analyzed. It is shown that thermodiffusion can strongly influence the thermal lens value and transmittance coefficient of the medium.

Ключевые слова: тепловая линза, термодиффузия, двухкомпонентная среда, самовоздействие света.

Термооптическая спектроскопия является перспективным и интенсивно развивающимся разделом прикладной оптики [1, 2]. Одним из первых термооптических методов стал применяться метод термолинзовой спектрометрии.

Сущность метода заключается в следующем. При воздействии на поглощающую среду лазерного пучка с гауссовским распределением мощности в поперечном сечении в ней в результате локального нагрева устанавливается градиент температуры. Изменение температуры в поглощающей среде вызывает изменение показателя преломления среды в соответствии с распределением мощности лазерного пучка. Из-за появления градиента показателя преломления в среде возникает оптический элемент, аналогичный по своему действию рассеивающей линзе, получившей название термолинзы [1].

В жидких двухкомпонентных средах кроме обычного теплового отклика, связанного с тепловым расширением среды, могут возникать концентрационные потоки, обусловленные явлением термодиффузии (эффекта Соре) [3–5]. В этом случае появляется дополнительный механизм оптической нелинейности среды, обусловленный перераспределением концентрации компонент в неоднородном световом поле и соответствующим изменением показателя преломления (и поглощения) среды, который обычно не учитывается.

Целью данной работы является анализ процессов тепломассопереноса в двухкомпонентной среде под действием гауссова пучка излучения, определяющих параметры стационарной тепловой линзы.

Рассмотрим двухкомпонентную жидкофазную среду, коэффициент поглощения которой α целиком определяется одним компонентом с массовой концентрацией C ($\alpha = \beta C$, где $\beta = (\partial \alpha / \partial C)$ – константа среды). Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя $I = I_0 \exp(-2r^2 / \omega^2)$, где: ω – радиус пучка, r – расстояние от оси пучка (рис. 1).

Систему балансных уравнений для концентрации C и теплового потока запишем следующим образом:

$$c_p \rho \partial T / \partial t = -\operatorname{div} J_1 + \alpha I_0 \exp(-2r^2 / \omega^2), \quad (1)$$

$$\partial C / \partial t = -\operatorname{div} J_2, \quad (2)$$

где: c_p, ρ – удельные теплоемкость и плотность среды, T – температура среды, J_1 и J_2 – тепловой и концентрационный потоки соответственно:

$$J_1 = -D_{11} \operatorname{grad} T, \quad (3)$$

$$J_2 = -D_{21} C \operatorname{grad} T - D_{22} \operatorname{grad} C, \quad (4)$$

где: D_{11} – коэффициент теплопроводности среды, D_{22} – коэффициент диффузии поглощающих частиц, D_{21} – коэффициент термодиффузии.

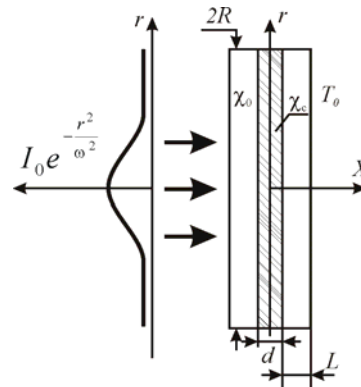


Рис. 1. К расчету тепловой линзы в двухкомпонентной среде в тонкослойной цилиндрической кювете

В стационарном режиме, считая, что для малых толщин слоя среды d и окна кюветы L ($d, L \ll \omega$) можно пренебречь радиальным (вдоль r) тепловым потоком, получаем из (1, 3) одномерную тепловую задачу:



$$0 = D_{11} \partial^2 T / \partial x^2 + \alpha I_0 \exp(-2r^2 / \omega^2). \quad (5)$$

Граничные условия соответствуют конвективному теплообмену на границе раздела окно кюветы-воздух:

$$J_2(\pm L) = \gamma(T_2 - T_0), \quad (6)$$

где: γ, T_0 – соответственно коэффициент конвективного теплообмена и температура внешней среды, $T_2 = T(L + d/2)$. Для температуры среды в центре кюветы из (5, 6) получаем:

$$T(0, r) = T_0 + \alpha d I_0 (L \chi_0^{-1} + \gamma^{-1} + d \chi_c^{-1} / 2) \exp(-2r^2 / \omega^2), \quad (7)$$

где: χ_0, χ_c – коэффициенты теплопроводности материала окон кюветы и двухкомпонентной среды соответственно. Для толщин слоя $d \ll L$ можем пренебречь изменением температуры в слое среды по толщине кюветы, и принять ее равной $T(0)$. В установившемся режиме $(\partial T / \partial t) = (\partial C / \partial t) = 0$ из (2, 4) имеем для стационарного значения концентрации C :

$$-D_{21} C \text{grad} T - D_{22} \text{grad} C = 0. \quad (8)$$

Считая изменение концентрации поглощающей компоненты малым по сравнению с начальным, имеем $C_1 = C - C_0$, где $C \ll C_0$. Тогда из (8) с учетом (7) получаем линеаризованное уравнение по C_1 :

$$\nabla C_1 (1 + C_0 F \exp(-2r^2 / \omega^2)) = C_0 F \frac{4r}{\omega^2} \exp(-2r^2 / \omega^2), \quad (9)$$

где: $F = \beta d (L \chi_0^{-1} + \gamma^{-1} + d \chi_c^{-1} / 2) D_{21} D_{22}^{-1}$, C_0 – начальная концентрация частиц, R – радиус цилиндрической кюветы.

Из (9) получаем:

$$C_1 = C_0 \ln[1 + F C_0 \exp(-2r^2 / \omega^2)]^{-1} \quad (10)$$

Тогда с учетом (10) и (8) получим:

$$\Delta T = \frac{F D_{22}}{D_{21}} (\exp(-2r^2 / \omega^2)) C_0 [C_0 + \ln(1 + F C_0 \exp(-2r^2 / \omega^2))^{-1}] \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{F D_{22}}{D_{21}} \frac{4}{\omega^2} C_0^2 [1 + 2F] \quad (12)$$

Подставляя в формулу для фокусного расстояния термолинзы [1]:

$$F_T = \left[-d \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \right]_{r=0}^{-1}, \quad (13)$$

окончательно получим:

$$F_T = \left[-d \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \frac{FD_{22}}{D_{21}} \frac{4}{\omega^2} C_0^2 [1 + 2F] \right]_{r=0}^{-1} \quad (14)$$

Как видно из последнего выражения, кроме обычного термолинзового отклика в двухкомпонентной среде появляется дополнительный, 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. Во-вторых, на величину термолинзового отклика будет влиять и изменение пропускания слоя среды (9). Наконец, из-за существенно различных времен установления теплового и концентрационного квазистационарных режимов необходимо отдельно исследовать динамику термолинзового отклика, которая может значительно отличаться от классического случая простого теплопереноса [1].

Таким образом, самоиндуцированную 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 теплопереноса в многокомпонентных жидкофазных средах [5–8].

Библиографические ссылки

1. Там Э. Э., Бердж Р. Р., Фанг Х. Л. и др. / Под ред. Клайджера Д. // Сверхчувствительная лазерная спектроскопия. – М.: Мир, 1986.
2. Гришко В. И., Гришко В. П., Юделевич И. Г. Лазерная аналитическая термооптическая спектрометрия. – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 1992.
3. Giglio M., Vendramini A. Thermal lens effect in binary liquid mixture: A new effect // Appl. Phys. Lett. – 1974. – Vol. 25. – № 10.
4. Рабинович Г. Д. Разделение изотопов и других смесей термодиффузией. – М.: Атомиздат, 1981.
5. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // Philosoph. Mag. B. – 2002. – Vol. 82. – № 4.
6. Иванов В. И., Окишев К. Н., Карпец Ю. М., Ливаишвили А. И. Самовоздействие гауссова пучка в жидкофазной микрогетерогенной среде // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5.
7. Иванов В. И., Ливаишвили А. И., Лобов А. Н., Симаков С. Р. Динамические голограммы в микрогетерогенных жидкофазных средах // Оптический журнал. – 2004. – № 9.
8. Иванов В. И., Ливаишвили А. И., Брюханова Т. Н., Рекунова Н. Н. Пространственно-временные характеристики термоиндуцированного механизма записи рельефных динамических голограмм // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 3 (22). – 2011.