

УДК 543.4

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОЛИМЕРНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К.

*ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»,
Хабаровск, e-mail: tmeh@festu.khv.ru*

Метод тепловой линзы широко используется для 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 дисперсной компоненты в жидкости в результате термодиффузии меняет величину термолинзового отклика среды. В данной работе проанализирована двумерная термодиффузия в двухкомпонентной жидкофазной среде в поле пучка излучения с однородной интенсивностью. Термолинзовый отклик анализируется в двухлучевой схеме, когда опорный и сигнальный пучки имеют разные длины волн. В результате точного аналитического решения задачи в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика двухкомпонентной среды. Полученные результаты актуальны для оптической диагностики дисперсных жидкофазных сред, в том числе термооптической спектроскопии.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, тепловая линза, оптическая нелинейность

THE OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE POLIMER NANOPARTICLES

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

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

Thermal lens technique is widely used for the 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 dispersed components in the liquid as a result of thermal diffusion changes the magnitude of medium thermal lens response. This paper analyzed the two-dimensional thermodiffusion in two-component in a uniform intensity Gaussian beam radiation field. The thermal lens response is analyzed in the two-beam scheme when the reference and signal beams are of different wavelengths. As a result of the exact analytical solution of the problem the expression for the two-component medium stationary thermal lens response is achieved. The results are relevant to optical diagnostics of dispersed liquid environments, including the thermo-optical spectroscopy.

Keywords: radiation self-action, thermal lens, optical nonlinearity

Нелинейно-оптические методы диагностики материалов, основанные на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды, широко используются в аналитической химии [2, 8, 10–12, 14]. Светоиндуцированное изменение концентрации полимерных наночастиц приводит к соответствующей модуляции оптических свойств среды. Это позволяет реализовать различные модификации оптического бесконтактного контроля параметров наночастиц практически в реальном времени. Например, метод тепловой линзы используется в термооптической спектроскопии, в оптической диагностике материалов [4–7]. 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 (эффект Соре) [1–2].

Целью данной работы является теоретический анализ термодиффузионного вклада в формирование линзы в двухкомпо-

нентной среде под действием пучка излучения с равномерным профилем интенсивности в ограниченной кювете.

Рассмотрим двухлучевую термолинзовую схему (рис. 1): на кювету с двухкомпонентной средой (наножидкостью) падает опорный пучок с равномерным профилем интенсивности I_0 , формирующий температурное поле. Образованная в среде линза тестируется сигнальным гауссовым пучком с другой длиной волны. Для определения величины термодиффузионной линзы рассмотрим систему балансных уравнений, описывающих процессы, возникающие при воздействии светового поля с бинарной смесью [5]:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \nabla^2 T + \alpha I_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + D_r \operatorname{div} [C(1-C) \nabla T], \quad (2)$$

где T – температура среды; $C(r, t)$ – массовая концентрация наночастиц; χ – коэффициент теплопроводности среды; c_p , ρ – соответственно удельные теплоемкость

и плотность жидкости; α – коэффициент поглощения излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения светового пучка; D и D_T – коэффициенты диффузии и термодиффузии.

В стационарном случае $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0\right)$ уравнение (1) принимает вид

$$0 = \chi \nabla^2 T + \alpha I_0. \quad (3)$$

Будем рассматривать случай малых концентраций ($C \ll 1$) и малых ее изменений, тогда уравнение (2) в стационарном режиме принимает вид

$$0 = D \nabla^2 C + D_T C_0 \nabla^2 T, \quad (4)$$

где C_0 – начальная концентрация частиц.

С учетом подстановки (3) уравнение (4) преобразуется:

$$\Delta C = \alpha C_0 \frac{D_T}{D} \frac{I_0}{\chi}. \quad (5)$$

В дальнейшем, переходя к цилиндрическим координатам, имеем задачу

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2} = \alpha C_0 \frac{D_T}{D} \frac{I_0}{\chi},$$

$$0 \leq r \leq R; \quad (6)$$

$$C(R) = C_0, \quad (7)$$

где φ – полярный угол в плоскости перпендикулярной оси Z ; R – радиус цилиндрической кюветы.

Решение задачи (6)–(7) получаем с учетом существования конечной производной

$\frac{\partial C}{\partial r}$ при $r = 0$ и независимости концентрации от угла φ :

$$C(r) = C_0 \left(1 + \alpha \frac{D_T}{4D} \frac{I_0}{\chi} (r^2 - R^2) \right). \quad (8)$$

Решая аналогичным способом тепловую задачу (3) с учетом $T(R) = T_0$, где T_0 – температура на границе кюветы, получаем

$$T(r) = T_0 + \frac{\alpha I_0}{4\chi} (R^2 - r^2). \quad (9)$$

Термолинзовый сигнал $\mathfrak{Y}(t)$ показывает изменение интенсивности, регистрируемое фотоприемником за экраном:

$$\mathfrak{Y}(t) = \frac{I(t) - I(0)}{I(0)}. \quad (10)$$

Для расчета термолинзового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [15]:

$$\mathfrak{Y}_{st} = - \frac{2(z_1/l_0) \Phi_{nl}(0)}{(1+z_1^2/l_0^2)(1+3z_1^2/l_0^2)}, \quad (11)$$

где Z_1, Z_2 – расстояния от центра кюветы до перетяжки гауссова пучка и до экрана соответственно (рис. 1), $l_0 = \pi r_0^2 / \lambda$; r_0 – радиус перетяжки гауссова пучка; $\Phi_{nl}(0)$ – нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка.

Нелинейный набег фаз складывается из двух вкладов – теплового расширения дисперсной фазы и концентрационного,

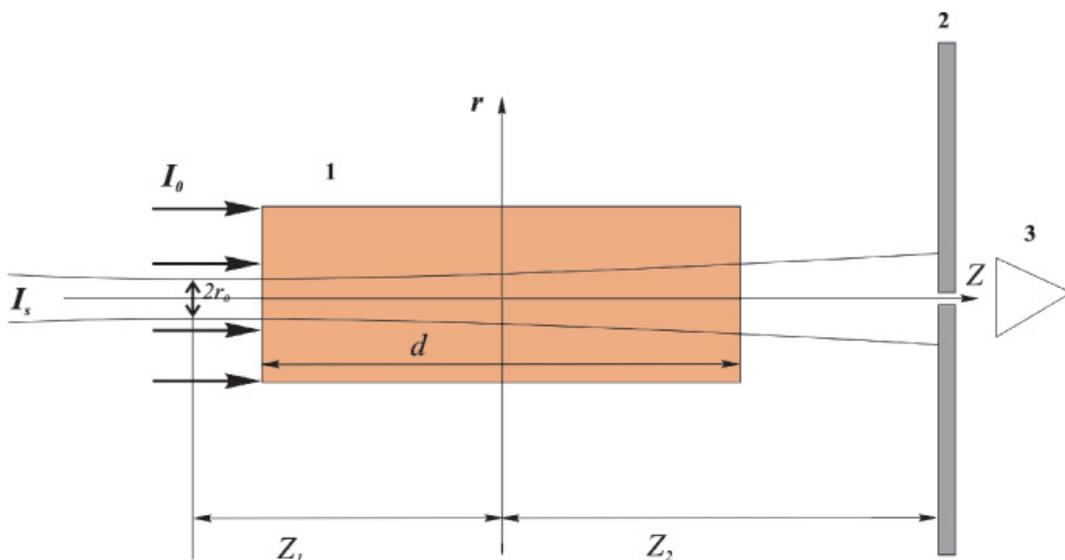


Рис. 1. Двухлучевая термолинзовая схема

связанного с изменением концентрации дисперсных частиц:

$$\Phi_{nl}(0) = \Phi_T(0) + \Phi_C(0); \quad (12)$$

$$\Phi_T(0) = k \int_0^d \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T(z, r=0) dz; \quad (13)$$

$$\Phi_C(0) = k \int_0^d \left(\frac{\partial n}{\partial C} \right) \Delta C(z, r=0) dz, \quad (14)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор излучения зондирующего пучка I_s .

Интегрируя (13) и (14) получаем

$$\Phi_T(0) = -k \frac{\alpha I_0}{4\chi} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) d; \quad (15)$$

$$\Phi_C(0) = k \alpha I_0 C_0 \frac{D_T}{4D} \left(\frac{\partial n}{\partial C} \right) d. \quad (16)$$

Таким образом можно получить величину стационарного термолинзового сигнала:

$$\mathfrak{S}_{st} = -\frac{z_1}{l_0} \frac{k \alpha I_0 d}{2} \frac{\left(S_T C_0 \left(\frac{\partial n}{\partial C} \right) - \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \right)}{\left(1 + z_1^2/l_0^2 \right) \left(1 + 3z_1^2/l_0^2 \right)}, \quad (17)$$

где $S_T = \frac{D_T}{D}$ – параметр Соре.

Рассмотрим отношение двух вкладов

$$\gamma = \frac{\Phi_C(0)}{\Phi_T(0)};$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{\partial n}{\partial C} \right) C_0 \Delta C}{\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T} = f_0 S_T \delta \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где $f_0 = \frac{4}{3} \pi a^3 C_0$ – начальное значение объемной доли нанопазы. Здесь учтено, что параметр $\frac{\partial n}{\partial C}$ можно найти как

$$\frac{\partial n}{\partial C} = \frac{4}{3} \pi a^3 \delta, \quad (19)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления жидкости и дисперсной сред соответственно; V – объем частиц, $\delta = n_1 - n_2$; a – радиус частиц.

Экспериментальные данные показывают, что, как правило, коэффициент Соре для наночастиц прямо пропорционален их размеру [13]. Температурный коэффициент $\frac{\partial n}{\partial T}$

для большинства жидкостей лежит в диапазоне $2 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. На рис. 2 показаны графики зависимости γ от коэффициента Соре для $f_0 = 10^{-2}$ и $f_0 = 10^{-3}$; $\frac{\partial n}{\partial T} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\delta = 10^{-2}$.

Из графиков видно, что для достаточно больших наночастиц (с радиусом около 100 нм) и при значительных объемных долях концентрационный вклад в термолинзовый отклик сравним с таковым для жидкости.

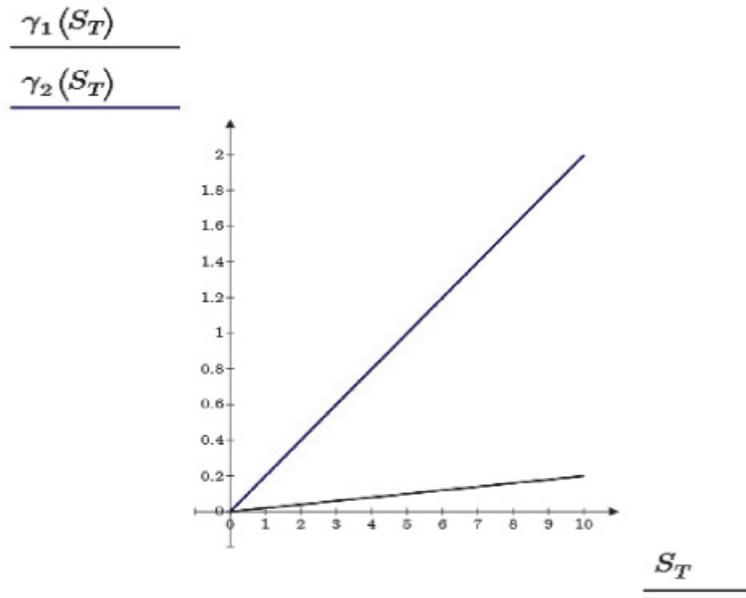


Рис. 2. Зависимости γ от коэффициента Соре для $f_0 = 10^{-2}$ (—) и $f_0 = 10^{-3}$ (---)

Таким образом, в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика двухкомпонентной среды, обусловленного термодиффузией. Результаты представляют интерес для термолинзовой спектроскопии многокомпонентных сред [14], оптической диагностики, а также нелинейной адаптивной оптики [3–6, 9].

Список литературы

1. Доронин И.С. Термодиффузия наночастиц в жидкости / И.С. Доронин, Г.Д. Иванова, А.А. Кузин, К. Н. Окишев // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6. – С. 238–242.
2. Иванов В.И. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик жидкофазной дисперсной среды / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // *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, 2013. – Вып. 5. – С. 112–115.
3. Иванов В.И. Обращение волнового фронта при четырехволновом смешении непрерывного излучения в условиях сильного самовоздействия / В.И. Иванов, А.И. Илларионов и др. // *Письма в журнал технической физики*. – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 60–63.
4. Иванов В.И. Самовоздействие гауссова пучка в жидкофазной микрогетерогенной среде / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, А.И. Ливашвили, К.Н. Окишев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 23–24.
5. Иванов В.И. Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили // *Оптика атмосферы и океана*. – 2009. – Т. 22. – № 8. – С. 751–752.
6. Иванов В.И. Термоиндуцированное самовоздействие нелинейного поглощения суспензии наночастиц / В.И. Иванов, С.В. Климентьев, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили // *Оптика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 23. – № 2. – С. 106–107.
7. Иванов В.И. Термоиндуцированное самовоздействие гауссова пучка излучения в жидкой дисперсной среде / В.И. Иванов, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика*. – 2010. – Т. 5. – № 1. – С. 5–8.
8. Иванов В.И. Термолинзовая спектроскопия двухкомпонентных жидкофазных сред / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2011. – № 4. – С. 39–44.
9. Иванов В.И. Микрогетерогенные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, С.И. Кириوشина, А.В. Мяготин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12–12. – С. 2580–2583.
10. Иванов В.И. Термодиффузионный механизм записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентной среде / В.И. Иванов, К.Н. Окишев // *Письма в журнал технической физики*. – 2006. – Т. 32. – № 22. – С. 22–25.
11. Иванова Г.Д. Нелинейная линза в дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кириوشина, А.В. Мяготин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1. URL: www.science-education.ru/121-19194.
12. Иванова Г.Д. Динамические голограммы в жидкофазной дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кириوشина, А.В. Мяготин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9–10. – С. 2164–2168.
13. Иванова Г.Д. Исследование явлений массопереноса в бинарных средах термографическим методом / Г.Д. Иванова, С.И. Кириوشина, А.А. Кузин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2. www.science-education.ru/116-12579.
14. Иванова Г.Д. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости / Г.Д. Иванова, А.И. Ливашвили, В.К. Хе // *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.
15. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 5. – С. 85–92.

References

1. Doronin I.S. Termodiffuzija nanochastic v zhidkosti / I.S. Doronin, G.D. Ivanova, A.A. Kuzin, K. N. Okishev // *Fundamentalnye issledovanija*. 2014. no. 6. pp. 238–242.
2. Ivanov V.I. Vlijanie termodiffuzii na termolinzovyy otklik zhidkofaznoj dispersnoj sredy / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. He // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshhej redakciej V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2013. Vyp. 5. pp. 112–115.
3. Ivanov V.I. Obrashhenie volnovogo fronta pri chetyrehvolnovom smeshenii nepreryvnogo izlucheniya v uslovijah sil'nogo samovozdejstvija / V.I. Ivanov, A.I. Illarionov i dr. // *Pisma v zhurnal tehnicheckoj fiziki*. 1997. T. 23. no. 15. pp. 60–63.
4. Ivanov V.I. Samovozdejstvie gaussova puchka v zhidkofaznoj mikrogeterogennoj sredy / V.I. Ivanov, Ju.M. Karpec, A.I. Livashvili, K.N. Okishev // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2005. T. 308. no. 5. pp. 23–24.
5. Ivanov V.I. Samovozdejstvie gaussova puchka izlucheniya v sloe zhidkofaznoj mikrogeterogennoj sredy / V.I. Ivanov, A.I. Livashvili // *Optika atmosfery i okeana*. 2009. T. 22. no. 8. pp. 751–752.
6. Ivanov V.I. Termodiffuzionnyj mehanizm nelinejnogo pogloshhenija suspenzii nanochastic / V.I. Ivanov, S.V. Klimentev, A.A. Kuzin, A.I. Livashvili // *Optika atmosfery i okeana*. 2010. T. 23. no. 2. pp. 106–107.
7. Ivanov V.I. Termoinducirovannoe samovozdejstvie gaussova puchka izlucheniya v zhidkoj dispersnoj sredy / V.I. Ivanov, A.A. Kuzin, A.I. Livashvili // *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo un-ta. Serija: Fizika*. 2010. T. 5. no. 1. pp. 5–8.
8. Ivanov V.I. Termolinzovaja spektroskopija dvuhkomponentnyh zhidkofaznyh sred / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. He // *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. no. 4. pp. 39–44.
9. Ivanov V.I. Mikrogeterogennye sredy dlja dinamicheskogo golografii / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Fundamentalnye issledovanija*. 2014. no. 12–12. pp. 2580–2583.
10. Ivanov V.I. Termoinducirovannoe samovozdejstvie amplitudnyh dinamicheskijh gologramm v dvuhkomponentnoj sredy / V.I. Ivanov, K.N. Okishev // *Pisma v zhurnal tehnicheckoj fiziki*. 2006. T. 32. no. 22. pp. 22–25.
11. Ivanova G.D. Nelinejnaja linza v dispersnoj sredy / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2015. no. 1. URL: www.science-education.ru/121-19194.
12. Ivanova G.D. Dinamicheskie gologrammy v zhidkofaznoj dispersnoj sredy / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Fundamentalnye issledovanija*. 2014. no. 9–10. pp. 2164–2168.
13. Ivanova G.D. Issledovanie javlenij massoperenosa v binarnykh sredah termograficheskim metodom / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.A. Kuzin // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2014. no. 2. www.science-education.ru/116-12579.
14. Ivanova G.D. Stacionarnyj termolinzovyy otklik nanozhidkosti / G.D. Ivanova, A.I. Livashvili, V.K. He // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshhej redakciej V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2014. Vyp. 6. pp. 227–230.
15. Suhorukov A.P. Difrakcija svetovyh puchkov v nelinejnykh sredah // *Sorosovskij obrazovatelnyj zhurnal*. 1996. no. 5. pp. 85–92.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика», ФГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск;

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика», проректор по учебной работе, ФГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск.