Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 535.211

ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЙ ВКЛАД В ТЕРМОЛИНЗОВЫЙ ОТКЛИК НАНОСУСПЕНЗИИ

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

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

tneh@festu.khv.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.280

Аннотация: Представлена новая двухлучевая схема термолинзового метода диагностики наносуспензий. Предложенная конфигурация устраняет влияние электрострикционного отклика и обеспечивает таким образом определение коэффициента термодиффузии наночастиц.

Ключевые слова: тепловая линза, наносуспензия, термодиффузия, электрострикция.

Термолинзовый метод является эффективным методом диагностики жидких двухкомпонентных сред [1]. В таких средах кроме обычного термолинзового отклика, обусловленного тепловым расширением среды, могут возникать светоиндуцированные концентрационные потоки дисперсных наночастиц [2-4]. Поэтому с помощью данного метода можно исследовать светоиндуцированные и термоиндуцированные механизмы дрейфа наночастиц. Наносуспензии характеризуются двумя концентрационными механизмами нелинейного отклика – электрострикционным и термодиффузионным [3-6]. Электрострикционный отклик легко рассчитывается при наличии известных оптических параметров наночастиц [3, 4]. Величина термодиффузионного вклада определяется коэффициентом термодиффузии наночастиц, который обычно измеряется экспериментально [5-7]. Оба вклада могут быть сравнимы по величине и характеризуются одинаковыми временами релаксации [8, 9]. Если оптические константы наночастиц не известны с достаточной точностью, то выделение термодиффузионного вклада в термолинзовый отклик становится невозможным.

Целью данной работы является теоретический анализ термодиффузионного вклада в формирование термолинзового отклика в наносуспензии в модифицированной двухлучевой схеме, устраняющей влияние электрострикционного эффекта.

Рассмотрим двухлучевую термолинзовую схему (см. рис. 1). В классической конфигурации для создания тепловой линзы используется достаточно мощный гауссовый пучок накачки [10]. В этом случае в наносуспензии возникает как электрострикционный, так и термодиффузионный отклики. Мы предлагаем использовать в качестве накачки световой пучок с равномерным пространственным профилем интенсивности I_0 . Слабый гауссовый сигнальный лазерный луч I_s

тестирует образованную тепловую линзу. Предложенная конфигурация устраняет влияние электрострикционного эффекта и позволяет исследовать термодиффузионный отклик в чистом виде.

Рис. 1. Двухлучевая термолинзовая схема (1 – цилиндрическая кювета с наносuspensionей, 2 – экран с отверстием на оси z , 3 – фотоприемник).

Термолинзовый сигнал $\mathcal{G}_c(t)$ показывает изменение интенсивности, регистрируемое фотоприемником за экраном:

$$\mathcal{G}_c(t) = \frac{I(t) - I(0)}{I(0)}. \quad (1)$$

Для определения термолинзового сигнала воспользуемся выражением для линзовой прозрачности кюветы 1 [11]:

$$\mathcal{G}_{st} = - \frac{2(z_1/l_0)\Phi_{nl}(0)}{(1+z_1^2/l_0^2)(1+3z_1^2/l_0^2)}. \quad (2)$$

Здесь z_1 – расстояние от центра кюветы до перетяжки гауссова пучка, $l_0 = \pi r_0^2 / \lambda$ конфокальный параметр сигнального луча, λ – длина световой волны, r_0 – радиус гауссова пучка в перетяжке, $\Phi_{nl}(0)$ – нелинейный набег фазы на оси оптической ячейки.

Нелинейный набег фазы состоит из двух вкладов – связанного с тепловым расширением среды $\Phi_T(0)$ и концентрационного $\Phi_C(0)$, обусловленного термодиффузией наночастиц:

$$\Phi_{nl}(0) = \Phi_T(0) + \Phi_C(0), \quad (3)$$

$$\Phi_T(0) = k \int_0^d \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T(z, r=0) dz. \quad (4)$$

$$\Phi_C(0) = k \int_0^d \left(\frac{\partial n}{\partial C} \right) \Delta C(z, r=0) dz. \quad (5)$$

Здесь $k = 2\pi / \lambda$ – волновой вектор световой волны, $(\partial n / \partial T)$ –

температурный коэффициент показателя преломления жидкости, $(\partial n / \partial C) = (4/3)\pi a_0^3(n_p - n_l)$, a_0 – радиус наночастицы, n_l, n_p – показатели преломления вещества соответственно жидкости и частиц. $\Delta T(z, r=0)$ и $\Delta C(z, r=0)$ – это светоиндуцированные изменения температуры среды и концентрации наночастиц соответственно на оси кюветы.

Для определения последних рассмотрим систему балансных уравнений, описывающих тепловые и концентрационные потоки, возникающие в наносuspензии при воздействии светового поля [8]:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \nabla^2 T + \alpha I_0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + D_T \operatorname{div}[C(1-C) \nabla T], \quad (7)$$

где T – температура среды, $C(r, t)$ – массовая концентрация частиц, χ – коэффициент теплопроводности среды, c_p, ρ – соответственно удельные теплоемкость и плотность жидкости, α – коэффициент поглощения излучения, I_0 интенсивность пучка накачки, D и D_T – коэффициенты диффузии и термодиффузии.

Для случая малых концентраций ($C \ll 1$) и малых ее изменений можно представить искомую концентрацию в виде суммы невозмущенной части C_0 и возмущенной C_N :

$$C(r, t) = C_0 + C_N(r, t) = C_0(1 + C'(r, t)), \quad C'(r, t) = C_N(r, t)/C_0 \ll 1. \quad (8)$$

Температурное поле в системе устанавливается быстрее, чем распределение концентрации частиц, что позволяет решать концентрационную задачу в условиях стационарной температуры [8].

Начальные и граничные условия:

$$C(r, 0) = C_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad (9)$$

$$C(R, t) = C_0, \quad T(R, t) = T_0, \quad (10)$$

где R – радиус цилиндрической кюветы.

Решение задачи (6) можно получить с помощью соответствующей функции Грина:

$$T(r, t) = T_0 + \alpha I_0 \chi^{-1} R^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r / R) [1 - \exp\{-\mu_n^2 t / \tau_{th}\}]}{\mu_n^2 J_1^2(\mu_n)}, \quad (11)$$

$$\tau_{th} = 4R^2 c_p \rho \chi^{-1}, \quad (12)$$

где μ_n – табулированные положительные корни уравнения $J_0(\mu) = 0$, J_n – функции Бесселя n -го порядка, τ_{th} – время релаксации теплового отклика

Для концентрационного профиля имеем:

$$C'(r, t) = \alpha I_0 \chi^{-1} D_T D^{-1} R^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_m r / R) [1 - \exp\{-\mu_m^2 t / \tau_{thd}\}]}{\mu_m^2 J_1^2(\mu_m)}, \quad (13)$$

$$\tau_{thd} = R^2 D^{-1}, \quad (14)$$

где τ_{thd} – время релаксации термодиффузионного отклика

Полученные результаты позволяют рассчитать результирующий термолинзовый отклик:

$$\theta(t) = \frac{z_1 k \alpha d I_0 \chi^{-1} R^2 \{C_0 D_T D^{-1} (\partial n / \partial C) \Phi_{thd}(t) - (\partial n / \partial T) \Phi_{th}(t)\}}{4 I_0 (1 + z_1^2 / l_0^2) (3 + z_1^2 / l_0^2)}, \quad (15)$$

$$\Phi_{thd}(t) = [1 - \exp\{-\mu_1^2 t / \tau_{thd}\}], \quad (16)$$

$$\Phi_{th}(t) = [1 - \exp\{-\mu_1^2 t / \tau_{th}\}]. \quad (17)$$

Первое слагаемое в (15) описывает термодиффузионный отклик, а второе – обычный тепловой отклик среды. Поскольку времена релаксации этих механизмов отличаются на несколько порядков, то оба вклада легко различаются экспериментально.

Таким образом, в работе предложен новый вариант двухлучевой термолинзовой схемы для исследования термодиффузии наночастиц. На основе решения задачи светоиндуцированного тепло-и массопереноса в наносuspension получено выражение для термолинзового отклика среды в данной схеме. Результаты представляют интерес для развития методов оптической диагностики жидкофазных наноматериалов [12-15].

Библиографический список:

1. **Гришко, В.И.** Лазерная аналитическая термооптическая спектроскопия / В.И. Гришко, В.П. Гришко, И.Г. Юделевич. – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 1992. – 327 с.
2. **Иванов, В.И.** Термолинзовая спектроскопия двухкомпонентных жидкофазных сред / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 039-042.
3. **Vicary, L.** Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion / L. Vicary // Philosophical Magazine B. – 2002. – V. 82. – I. 4. – P. 447-452.
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. **Cabrera, H.** A thermal lens model including the Soret effect / H. Cabrera, E. Sira, K. Rahn, M. García-Sucre // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 94. – I. 5. – P. 051103-1-051103-3.
6. **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.
7. **Ivanov, V.I.** Thermal lens response in the two-component liquid layer / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 19 November 2015. – 2015. – V. 9680. – P. 968042-1-968042-4.
8. **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.

9. **Ivanov, V.I.** Light induced lens response in nanosuspension / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Khabarovsk, 14 December 2016. – 2017. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8.

10. **Shen, J.** A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry / J. Shen, R.D. Lowe, R.D. Snook // Chemical Physics. – 1992. – V. 165. – I. 2-3. – P. 385-396.

11. **Сухоруков, А.П.** Дифракция световых пучков в нелинейных средах / А.П. Сухоруков // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 5. – С. 85-92.

12. **Иванов, В.И.** Термодиффузионный механизм 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.

13. **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. – 2013. – Вып. 5. – С. 112-115.

14. **Ivanov, V.I.** Light-induced thermodiffusion in two-component liquid / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, K.N. Okishev // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXII International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 29 November 2016. – 2016. – V. 10035. – P. 100354Y-1-100354Y-4.

15. **Ovseychuk, O.O.** Fiber optics method for nanomaterials diagnostics / O.O. Ovseychuk, V.I. Ivanov, A.V. Myagotin, G.D. Ivanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 286. – Conf. 1. – P. 012031-1-012031-5.

References:

1. **Grishko, V.I.** Lazernaya analiticheskaya termoopticheskaya spektrometriya / V.I. Grishko, V.P. Grishko, I.G. Yudelevich. – Novosibirsk: INH SO RAN, 1992. – 327 p.

2. **Ivanov, V.I.** Termolinizovaya spektroskopiya dvuhkomponentnyh zhidkofaznyh sred / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – no. 4. – P. 039-042.

3. **Vicary, L.** Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion / L. Vicary // Philosophical Magazine B. – 2002. – V. 82. – I. 4. – P. 447-452.

4. **Ivanov, V.I.** Samovozdejstvie gaussova puchka v zhidkofaznoj mikroeterogennoj srede / V.I. Ivanov, Yu.M. Karpec, A.I. Livashvili, K.N. Okishev // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2005. – V. 308. – no. 5. – P. 23-24.

5 **Cabrera, H.** A thermal lens model including the Soret effect / H. Cabrera, E. Sira, K. Rahn, M. García-Sucre // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 94. – I. 5. – P. 051103-1-051103-3.

6. **Ivanov, V.I.** Samovozdejstvie gaussova puchka izlucheniya v sloe zhidkofaznoj mikroeterogennoj sredy / V.I. Ivanov, A.I. Livashvili // Optika atmosfery i okeana. – 2009. – V. 22. – no. 8. – P. 751-752.

7. **Ivanov, V.I.** Thermal lens response in the two-component liquid layer / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 19 November 2015. – 2015. – V. 9680. – P. 968042-1-968042-4.

8. **Ivanov, V.I.** Termoinducirovannoe samovozdejstvie gaussova puchka izlucheniya v zhidkoj dispersnoj srede / V.I. Ivanov, A.A. Kuzin, A.I. Livashvili // Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Fizika». – 2010. – V. 5. – no 1. – P. 5-8.

9. **Ivanov, V.I.** Light induced lens response in nanosuspension / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Khabarovsk, 14 December 2016. – 2017. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8.
10. **Shen, J.** A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry / J. Shen, R.D. Lowe, R.D. Snook // Chemical Physics. – 1992. – V. 165. – I. 2-3. – P. 385-396.
11. **Suhorukov, A.P.** Difrakciya svetovykh puchkov v nelinejnykh sredakh / A.P. Suhorukov // Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. – 1996. – I. 5. – P. 85-92.
12. **Ivanov, V.I.** Termodiffuzionnyj mekhanizm nelinejnogo pogloshcheniya suspenzii nanochastic / V.I. Ivanov, S.V. Kliment'ev, A.A. Kuzin, A.I. Livashvili // Optika atmosfery i okeana. – 2010. – V. 23. – I. 2. – P. 106-107.
13. **Ivanov, V.I.** Vliyanie termodiffuzii na termolinzovyy otklik zhidkofaznoj dispersnoj sredy/ V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2013. – I. 5. – P. 112-115.
14. **Ivanov, V.I.** Light-induced thermodiffusion in two-component liquid / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, K.N. Okishev // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXII International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 29 November 2016. – 2016. – V. 10035. – P. 100354Y-1-100354Y-4.
15. **Ovseychuk, O.O.** Fiber optics method for nanomaterials diagnostics / O.O. Ovseychuk, V.I. Ivanov, A.V. Myagotin, G.D. Ivanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 286. – Conf. 1. – P. 012031-1-012031-5.

THERMODIFFUSION CONTRIBUTION IN THE THERMAL LENS RESPONSE OF THE NANOSUSPENSION

V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, A.V. Myagotin
Far Eastern State Transport University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.280

Abstract: A new two-beam configuration of the thermal lens method for the nonlinear optical diagnostics of nanosuspensions is presented. The proposed configuration eliminates the influence of the electrostrictive response and thus provides the determination of thermodiffusion coefficient of nanoparticles.

Keywords: *thermal lens response, nanosuspension, thermodiffusion, electrostriction.*

Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Мяготин Артем Владимирович – аспирант кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Иванова Галина Дмитриевна – старший преподаватель кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Valery I. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

Vladimir K. Khe – Ph. D. student, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

Galina D. Ivanova – Senior Lecturer, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University