

Модуляционный метод светоиндуцированной псевдо-призмы в наносуспензии

В.И. Иванов¹, И.Н. Егоршин²

¹ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»
680021, Россия, Хабаровский край, Хабаровск, ул. Серышева, 47

²ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»
680035, Россия, Хабаровский край, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136
valivi@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.134

Аннотация: В данной работе предлагается модуляционный метод создания псевдо-призмы в нанодисперсной жидкофазной среде, основанный на использовании светового давления излучения. Обычно метод псевдо-призмы применяется для исследования стационарного седиментационного профиля в дисперсной среде. Для наночастиц и макроскопических размеров кюветы характерные времена установления равновесия составляют десятки часов. Даже при значительных силах светового давления, превосходящих гравитационные, характерное время установления седиментационного профиля остается очень большим. Поэтому достижения равновесного распределения требует длительного эксперимента, что предъявляет высокие требования к стабильности всех условий и практически мало реализуемо из-за наличия конвективных течений. Модуляция опорного пучка позволяет исследовать динамику псевдо-призмы на коротких временах, что значительно повышает точность метода оптической диагностики. В статье представлен теоретический анализ процесса светоиндуцированного массопереноса в дисперсной жидкофазной среде, находящейся в однородном световом поле, модулированном по времени. В результате аналитического решения задачи о светоиндуцированном массопереносе получено выражение, позволяющее определить амплитуду угла отклонения сигнального луча в псевдо-призме.

Ключевые слова: метод псевдо-призмы, давление света, наножидкости, оптическая диагностика, седиментация, наночастицы.

1. Введение

Наносуспензии часто служат модельными системами для изучения процессов перколяции, фазового разделения и динамических явлений в системах с притягивающими взаимодействиями. С другой стороны, они находят широкое применение в различных областях, таких как пищевая промышленность, фармацевтика, производство средств личной гигиены и косметики, где они используются в качестве стабилизаторов сложных составов, предотвращая макроскопическое разделение фаз. При этом изучение таких материалов часто выполняют с применением оптических методов исследования. Среди последних широко применяются нелинейно-оптические методы диагностики материалов, основанные на разнообразных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды [1-5].

Многие исследования были посвящены изучению седиментационного поведения наносуспенсионий, в ходе которых было

выявлено множество интересных, но всё ещё не до конца изученных явлений, таких как замедленное осаждение. Процессы осаждения представляют собой широко распространённое явление в природе, имеющее важное значение как для технологии, так и для науки. В промышленности и лабораторных условиях используются осветлители и гравитационные отстойники для отделения частиц от потоков. Однако помимо практического интереса, исследования осадконакопления на модельных системах также предоставили фундаментальную информацию о структурных свойствах коллоидных суспензий.

Для изучения кинетики осаждения наносуспензий применяется метод псевдо-призмы, при котором в качестве измеряемого сигнала используется угол отклонения сигнального луча в слое среды с градиентом показателя преломления [6]. В частности, термоиндуцированная псевдо-призма в наносуспензии была использована для изучения термодиффузии наночастиц [7]. В данной работе предлагается использовать светоиндуцированную псевдо-призму, образованную светом давлением опорного излучения в прозрачной наносуспензии. Данный метод применим даже для наносуспензий, для которых из-за малого размера частиц наблюдение гравитационного осаждения проблематично. В то же время даже при значительных силах светового давления, превосходящих гравитационные, характерное время установления седиментационного профиля остается очень большим.

Целью данной работы является теоретический анализ отклонения луча в светоиндуцированной псевдо-призме при модулированном по времени опорном излучении, что значительно сокращает время наблюдения и увеличивает точность оптической диагностики.

2. Описание метода

Рассмотрим жидкофазную среду с наночастицами, представляющую собой дисперсную фазу, находящуюся под воздействием эталонного лазерного излучения с равномерным профилем интенсивности I_0 (см. рис. 1). Под воздействием сил светового давления в ячейке формируется градиент концентрации частиц и, как следствие, показателя преломления. Сигнальный луч I_s распространяется перпендикулярно опорному лучу и претерпевает отклонение в сформированной псевдо-призме.

Со стороны интенсивного опорного луча на наночастицу действует сила светового давления [7]:

$$F_p = AI_0(1 + \cos \Omega t), \quad (1)$$

где

$$A = \frac{128\pi^5 a^6 n_1}{3c_0 \lambda^4} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}, \quad (2)$$

здесь n_1 и n_2 – показатели преломления веществ дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно ($m = n_1/n_2$), a – радиус частицы, λ – длина волны излучения, c_0 – скорость света.

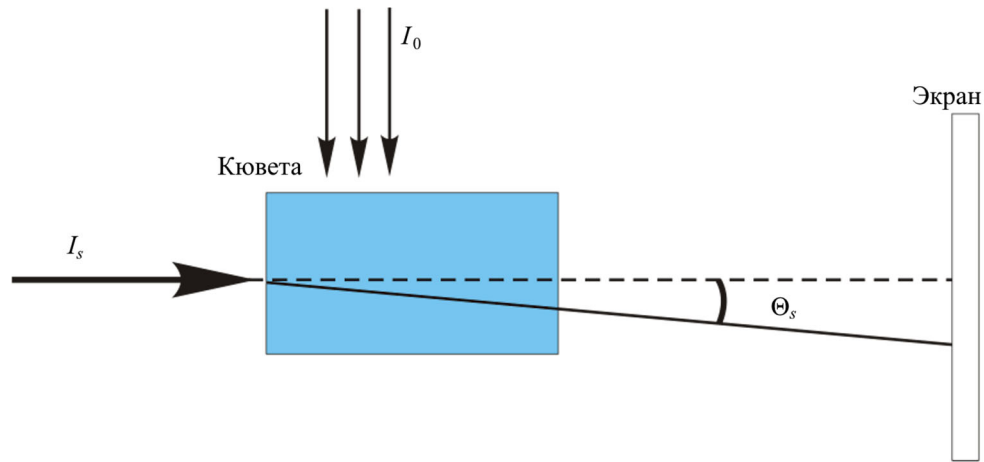


Рис. 1. Оптическая схема псевдо-призмы.

В [3] описано балансное уравнение, которое характеризует динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - V \nabla C. \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(r, t)$ – объемная концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии, V – скорость частицы:

$$V = \mu F_p,$$

где $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – коэффициент подвижности частиц, η – вязкость жидкости.

Для постоянной силы одномерное уравнение (3) после решения с учетом малых изменений концентрации дает нам:

$$C \approx C_0 \left\{ (Vl/D)z + (Vl/D) \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cos(k\pi z/l) / k^2 \pi^2 \right\} \exp(-k^2 \pi^2 D t / l^2), \quad (4)$$

где C_0 – начальная концентрация наночастиц, l – высота кюветы.

Характерное время релаксации τ_κ гармоники с номером κ :

$$\tau_\kappa = l^2 / k^2 \pi^2 D. \quad (5)$$

Для наночастиц и макроскопических размеров кюветы характерные времена достигают десятки часов. Поэтому достижения равновесного распределения требует длительного эксперимента, что предъявляет высокие требования к стабильности всех условий и практически мало реализуемо из-за наличия конвективных течений [8]. Поэтому использование модуляции опорного излучения и регистрации соответствующей частотной составляющей сигнала псевдо-призмы обладает рядом преимуществ.

Для амплитуды первой гармоники, которая формирует главный вклад в псевдо-призму на полувысоте кюветы имеем:

$$C_1 = C_0 (V / \pi D) 4 \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right) / \left[1 + (\Omega \tau_1)^2\right]. \quad (6)$$

Из полученного уравнения (6) для градиента концентрации наночастиц получаем:

$$\nabla C = C_0 (V / D) 2 \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) / \left[1 + (\Omega \tau_1)^2\right]. \quad (7)$$

Для расчета угла отклонения луча в псевдо-призме используем выражение [7]:

$$\vartheta_1 = (l / n) \nabla n, \quad (8)$$

где d – ширина кюветы вдоль пути пробного луча.

Для частиц с радиусом, много меньшим длины волны излучения π , показатель преломления среды пропорционален концентрации частиц [1]:

$$n = n_1 (1 + \Phi \delta), \quad (9)$$

где $\delta = (n_2 - n_1) / n_1$, $\Phi = \nu_0 C$ – объемная доля дисперсной среды, $\nu_0 = (4/3)\pi a^3$ – объем одной наночастицы.

Отсюда можно записать

$$\nabla n = n_1 \delta \nu_0 \nabla C. \quad (10)$$

Окончательно получаем для амплитуды угла отклонения пробного луча на полувысоте кюветы:

$$\vartheta_1(\Omega) = (V \delta \nu_0 d / D) C_0 2 / \left[1 + (\Omega \tau_1)^2\right]. \quad (11)$$

Полученное выражение позволяет определить отклик псевдо-призмы на модулированный опорный световой пучок, что значительно расширяет возможности метода и открывает новые возможности для исследований.

3. Заключение

Предлагаемая схема светоиндуцированной псевдо-призмы основана на светоиндуцированных явлениях и не требует наличия гравитации или поглощения среды. Это, в свою очередь, минимизирует влияние тепловой конвекции, которая обычно мешает проведению подобных исследований. В результате получено выражение для амплитуды угла отклонения луча в светоиндуцированной псевдо-призме в прозрачной дисперсной среде, такой как наносuspension. Результаты, полученные в данной работе, имеют значение для развития нелинейной оптики дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред [8-14].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Хабаровского края Российской Федерации в рамках гранта (98С/2024) в области научно-исследовательской деятельности.

Библиографический список:

1. **Lee, W.** Nonlinear optical response of colloidal suspensions / R. El-Ganainy, D. Christodoulides, K. Dholakia, E. Wright // *Optics Express*. – 2009. – V. 17. – I. 12. – P. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
2. **Ivanov, V.I.** Thermal lens response in the two-component liquid layer / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // *Proceedings of the SPIE*. – 2015. – V. 9680. – Art. № 968042. – 4 p. DOI: 10.1117/12.2205722.
3. **Ivanov, V.I.** The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia. – 2016. – V. 735. – Art. № 012013. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012013.
4. **Vicary, L.** Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // *Philosophical Magazine B*. – 2002. – V. 82. – I. 4. – P. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
5. **Ivanov, V.** A thermal lens response of the two components liquid in a thin him cell / V. Ivanov, G. Ivanova // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia. – 2016. – V. 735. – Art. № 012037. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012037.
6. **Buzzaccaro, S.** Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions / S. Buzzaccaro, A. Tripodi, R. Rusconi et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2008. – V. 20. – № 49. – Art. № 494219. – 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/20/49/494219.
7. **Ivanov, V.I.** Diagnostics of nanosuspension by the light-induced pseudo-prism method / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V. I. Krylov, V. K. Khe // *Proceedings of the SPIE*. – 2016. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8. DOI: 10.1117/12.2268280.
8. **Anghel, S.** Optical studies on sedimentation of suspensions / S. Anghel, I. Iova, S. Levai et al. // *Proceedings of the SPIE*. – 1998. – V. 3405. – P. 1027-1031. DOI: 10.1117/12.312708.
9. **Ivanova, G.** Light-induced sedimentation in nanoliquids / G. Ivanova, V. Khe, V. Ivanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1115. – I. 3. – Art. № 032086. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032086.
10. **Wongsuwarn, S.** Giant thermophoresis of poly(N-isopropylacrylamide) microgel particles / S. Wongsuwarn, D. Vigolo, R. Cerbino et al. // *Soft Matter*. – 2012. – V. 8. – I. 21. – P. 5857-5863. DOI: 10.1039/C2SM25061F.
11. **Khe, V.K.** Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension / V.K. Khe, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, P.G. Chigrin // *Proceedings of the SPIE*. – 2017. – V. 10466. – Art. № 104664K. – 7 p. DOI: 10.1117/12.2288774.
12. **Vigolo, D.** Thermophoresis: microfluidics characterization and separation / D. Vigolo, R. Rusconi, H.A. Stone, R. Piazza // *Soft Matter*. – 2010. – V. 6. – I. 15. – P. 3489-3493. DOI: 10.1039/C002057E.
13. **El-Ganainy, R.** Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions / R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, C. Rotschild, M. Segev // *Optics Express*. – 2007. – V. 15. – I. 16. – P. 10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.
14. **Pai, C.** Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic nanofluids / C. Pai, H. Muthurajan, N. Momin, M. Shalini, S. Radha // *ScienceJet*. – 2015. – V. 4. – Art. № 114. – 6 p.

References:

1. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Wright E. Nonlinear optical response of colloidal suspensions, *Optics Express*, 2009, vol. 17, issue 12, pp. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
2. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Thermal lens response in the two-component liquid layer, *Proceedings of the SPIE*, 2015, vol. 9680, art. no. 968042, 4 p. DOI: 10.1117/12.2205722.
3. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Mjagotin A.V. The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media, *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia, 2016, vol. 735, art. no. 012013, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012013.
4. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion, *Philosophical Magazine B*, 2002, vol. 82, issue 4, p. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
5. Ivanov V., Ivanova G. A thermal lens response of the two components liquid in a thin him cell, *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia, 2016, vol. 735, art. no. 012037, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012037.

6. Buzzaccaro S., Tripodi A., Rusconi R. et al. Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, vol. 20, no. 49, art. no. 494219, 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/20/49/494219.
7. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Krylov V.I., Khe V.K. Diagnostics of nanosuspension by the light-induced pseudo-prism method, *Proceedings of the SPIE*, 2016, vol. 10176, pp. P. 1017607-1-1017607-8. DOI: 10.1117/12.2268280.
8. Anghel S., Iova I., Levai S. et al. Optical studies on sedimentation of suspensions, *Proceedings of the SPIE*, 1998, vol. 3405, pp. 1027-1031 DOI: 10.1117/12.312708.
9. Ivanova G., Khe V., Ivanov V. Light-induced sedimentation in nanoliquids, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1115, issue 3, art. no. 032086, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032086.
10. Wongsuwarn S., Vigolo D., Cerbino R. et al. Giant thermophoresis of poly(N-isopropylacrylamide) microgel particles, *Soft Matter*, 2012, vol. 8, issue 21, pp. 5857-5863. DOI: 10.1039/C2SM25061F.
11. Khe V.K., Ivanov V. I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension, *Proceedings of the SPIE*, 2017, vol. 10466, art. no. 104664K, 7 p. DOI: 10.1117/12.2288774.
12. Vigolo D., Rusconi R., Stone H.A., Piazza R. Thermophoresis: microfluidics characterization and separation, *Soft Matter*, 2010, vol. 6, issue 15, pp. 3489-3493. DOI: 10.1039/C002057E.
13. El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Rotschild C., Segev M. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions, *Optics Express*, 2007, vol. 15, issue 16, pp.10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.
14. Pai C., Muthurajan H., Momin N., Shalini M., Radha S. Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic nanofluids, *ScienceJet*, 2015, vol. 4, art. № 114, 6 p.

Short Communication

A modulation method of light-induced pseudo-prism in nanosuspension

V.I. Ivanov¹, I.N. Egorshin²

¹*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia*

²*Pacific State University, Khabarovsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.134

Abstract: In this paper, a modulation method for creating a pseudo-prism in a nanodispersed liquid-phase medium is proposed, based on using the light pressure of radiation. Usually, the pseudo-prism method is used to study a stationary sedimentation profile in a dispersed medium. For nanoparticles and macroscopic cell sizes, the typical equilibrium times are tens of hours. Even with significant light pressure forces that exceed gravitational pressures, the characteristic time of settling the sedimentation profile remains very long. Therefore, achieving an equilibrium distribution requires a long experiment, which places high demands on the stability of all conditions and is practically unrealizable due to the presence of convective flows. Modulation of the reference beam makes it possible to study the dynamics of the pseudo-prism at short times, which significantly increases the accuracy of the optical diagnostic method. The article presents a theoretical analysis of the process of light-induced mass transfer in a dispersed liquid-phase medium located in a homogeneous time-modulated light field. As a result of the analytical solution of the problem of light-induced mass transfer, an expression was obtained that makes it possible to determine the amplitude of the angle of deflection of the signal beam in a pseudo-prism.

Keywords: *pseudoprism method, light pressure, nanofluids, optical diagnostics, separation, nanoparticles.*

Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»

Егоришин Иван Николаевич – старший преподаватель высшей школы физико-математических наук ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»

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

Ivan N. Egorshin – Senior Lecturer, Higher School of Physical and Mathematical Sciences, Pacific State University

Поступила в редакцию/received: 27.08.2024; после рецензирования/revised: 29.09.2024; принята/accepted 05.10.2024.