

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ПСЕВДО-ПРИЗМА В НАНОЖИДКОСТИ

Иванова Г.Д.¹, Хе В.К.¹

¹ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47), e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Нелинейно-оптические методы широко используются для оптической диагностики материалов в аналитической химии. Метод термоиндуцированной псевдо-призмы применяется для исследования двухкомпонентных сред. При этом измеряется угол отклонения светового луча в слое среды с термоиндуцированным градиентом показателя преломления. В данной работе предлагается способ создания псевдо-призмы в нанодисперсной жидкофазной среде за счет светового давления опорного излучения. В жидкофазной среде с наночастицами существует специфический механизм оптической нелинейности, основанный на перераспределении концентрации частиц дисперсной среды в световом поле. В работе проведен теоретический анализ светоиндуцированного массопереноса в дисперсной жидкофазной среде в однородном световом поле. В результате аналитического решения задачи светоиндуцированного массопереноса получено выражение для угла отклонения сигнального луча в псевдо-призме. Полученные результаты актуальны при исследовании дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред.

Ключевые слова: метод псевдо-призмы, световое давление, наножидкости.

THE LIGHT INDUCED PSEUDO-PRISM IN NANOFUID

Ivanova G.D.¹, Khe V.K.¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia (680021, Khabarovsk, Serysheva street, 47), e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Nonlinear optical techniques are widely used for the optical diagnostics of materials in the analytical chemistry. The thermo-induced pseudo-prism method is used to study of the two-component materials. It is measured the angle of the light beam in the material with the thermo-induced refractive index gradient. This paper proposes a way to create pseudo-prisms in the nanodispersive liquid through the light radiation pressure. In the dispersed environment there is a specific mechanism of optical nonlinearity based on the redistribution of the dispersed particle concentration in the light field. The theoretical analysis of the light induced mass transport task was executed in the dispersed medium in a homogeneous light field. As a result of the analytical solution of the light induced mass transport task it was obtained an expression for the deflection angle of the beam in a pseudo-prism. The results are relevant in the study of the dispersed liquid media, as well as optical diagnostics of such materials.

Keywords: pseudo-prism method, light pressure, nanofluids.

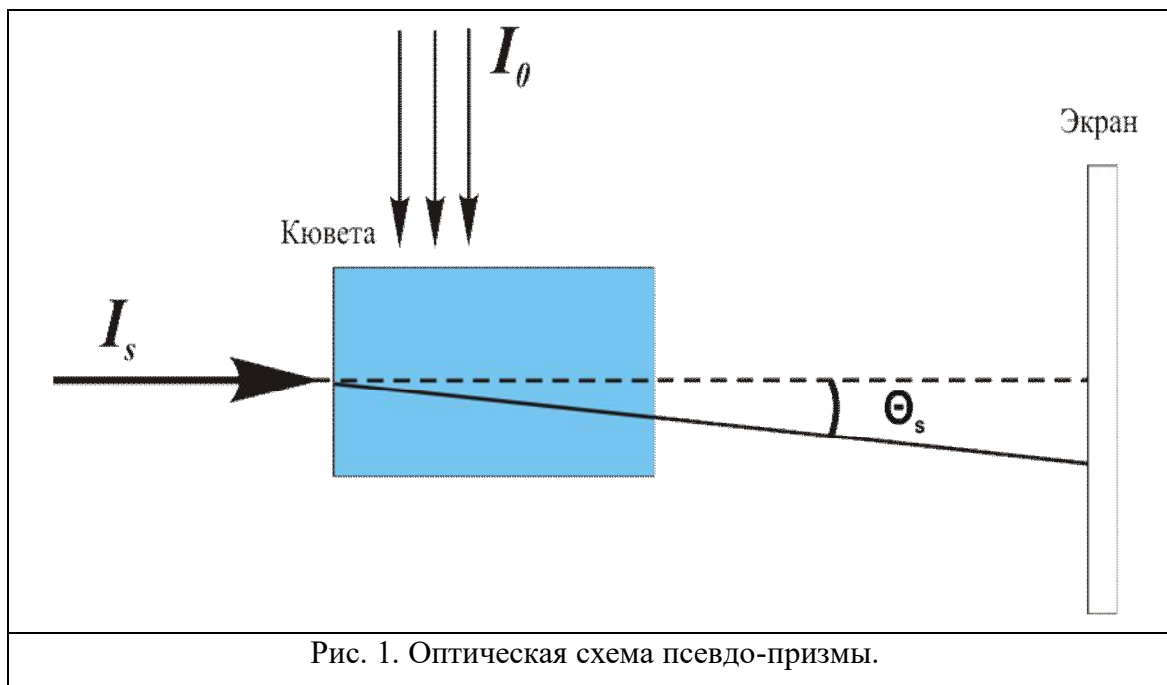
В аналитической химии широко используются нелинейно-оптические методы диагностики материалов, основанные на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды [1-3]. В этих материалах существуют концентрационные механизмы оптической нелинейности, основанные на термодиффузионном [6-7] и электрострикционном [8-9] эффектах. Светоиндуцированное изменение концентрации полимерных наночастиц приводит к соответствующей модуляции оптических свойств среды. Это позволяет реализовывать различные модификации оптического бесконтактного контроля параметров наночастиц практически в реальном времени.

Наиболее известные методы (тепловая линза, динамическая голография) успешно применяются для исследования жидких наносuspензий [3-9]. Гораздо реже используется метод псевдо-призмы, в котором в качестве измеряемого сигнала используют угол отклонения сигнального луча в слое среды с градиентом показателя преломления (метод псевдо-призмы) [10]. В частности, термоиндуцированная псевдо-призма в наносuspензии использовалась для исследования термодиффузии наночастиц [10].

В данной работе впервые предлагается использовать светоиндуцированную псевдо-призму для диагностики наногетерогенной жидкофазной среды. При этом для создания призмы в прозрачной наносuspензии используются силы светового давления.

Целью данной работы является теоретический анализ отклонения луча в светоиндуцированной псевдо-призме.

Рассмотрим жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием опорного лазерного излучения с равномерным профилем интенсивности I_0 (Рис.1). Под действием сил светового давления в кювете создается градиент концентрации частиц и, соответственно, показателя преломления. Сигнальный луч I_s распространяется перпендикулярно опорному и отклоняется в образованной псевдо-призме на угол θ_s .



Для расчета угла отклонения луча в псевдо-призме используем выражение [10]:

$$\vartheta_s = (d/n)(\nabla n), \tag{1}$$

где d -длина кюветы вдоль распространения сигнального луча, n - показатель преломления среды.

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

$$n = n_1(1 + \Phi\delta), \quad (2)$$

где $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$; n_1, n_2 - показатели преломления вещества дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно, $C(r, t)$ - объемная концентрация дисперсных частиц, $\Phi = v_0 C$ - объемная доля дисперсной среды, $v_0 = (4/3)\pi a^3$ - объем одной наночастицы.

Отсюда

$$\nabla n = n_1 \delta v_0 \nabla C. \quad (3)$$

Сила светового давления, действующая на наночастицу со стороны мощного опорного луча равна[8]:

$$F_p = AI_0, \quad (4)$$

где

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

$m = n_2/n_1$; n_1, n_2 - показатели преломления веществ дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно; a - радиус частицы, λ - длина волны излучения, C_0 - скорость света.

Балансное одномерное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузии [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - V \nabla C. \quad (6)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(z, t)$ - объемная концентрация дисперсных частиц, ось z направлена вдоль опорного пучка I_0 , D - коэффициент диффузии. Скорость частицы $V = \mu F_p$, где $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ - коэффициент подвижности частиц, η - вязкость жидкости.

Соответствующие граничные условия:

$$-D \nabla C + VC = 0, \text{ при } z = 0 \text{ и } z = l, \quad (7)$$

где l - высота кюветы вдоль распространения опорного луча.

Начальные условия:

$$C = C_0, \text{ при } t = 0, \quad (8)$$

где C_0 - начальная концентрация наночастиц.

Уравнения (6)-(8) являются третьей краевой задачей нестационарного массопереноса в сплошной среде, решение которой имеет вид:

$$C(z, t) = C_0 \frac{Vl}{D} \frac{\exp(\frac{V}{D}z)}{\exp(\frac{Vl}{D}) - 1} + \int_0^l C_0 G(z, \xi, t) d\xi, \quad (9)$$

где $G(z, \xi, t)$ – соответствующая функция Грина:

$$G(z, \xi, t) = \exp\left[\frac{-V(\xi - z)}{2D} - \frac{V^2 t}{4D}\right] \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{B_n} y_n(z) y_n(\xi) \exp(-D\mu_n t), \quad (10)$$

где введены обозначения:

$$y_n(z) = \cos(\mu_n z) + \frac{2DV - V}{2D\mu_n} \sin(\mu_n z), \quad (11)$$

$$B_n = \frac{l}{2} + \frac{l(2DV - V)^2}{8D^2\mu_n^2}. \quad (12)$$

Здесь μ_n – корни уравнения $tg(\mu l) = 0$.

Точное решение уравнения (3)-(5):

$$C(z, t) = C_0 \frac{Vl}{D} \left\{ \frac{\exp(\frac{V}{D}z)}{\exp(\frac{Vl}{D}) - 1} + \right. \\ \left. + e^{\frac{V}{2D}z} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4(k\pi)^2 [1 - (-1)^k e^{-\frac{Vl}{2D}}]}{\left(k^2\pi^2 + \left(\frac{Vl}{2D}\right)^2\right)^2} \left[\frac{Vl}{D(2k\pi)} \sin\left(\frac{k\pi z}{l}\right) + \cos\left(\frac{k\pi z}{l}\right) \right] e^{-(k^2\pi^2 + \left(\frac{Vl}{2D}\right)^2)\frac{t}{l}} \right\}. \quad (13)$$

Решение уравнения (10) в приближении малых изменений концентрации дает:

$$C \approx C_0 \left\{ (V/D)z + (Vl/D) \sum_{k=1}^{\infty} 4 \cos(k\pi z/l) / k^2 \pi^2 \right\} \exp\left(-k^2 \pi^2 Dt/l^2\right). \quad (14)$$

Из (14) получаем для градиента концентрации наночастиц:

$$\nabla C = C_0 (V/D) \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} 4 \exp\left(-k^2 \pi^2 Dt/l^2\right) \sin(k\pi z/l) / k\pi \right\}, \quad (15)$$

Пусть зондирующий луч распространяется точно по середине кюветы. Тогда для угла отклонения такого луча получаем:

$$\vartheta_s\left(\frac{l}{2}, t\right) = (C_0 V \delta v_0 d / D) \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} 4 \exp\left(-t/\tau_k\right) \sin(k\pi/2) / k\pi \right\}. \quad (16)$$

где введены времена релаксации пространственных решеток:

$$\tau_k = l^2 / (Dk^2 \pi^2). \quad (17)$$

Введем безразмерный угол отклонения (нормированный на установившееся стационарное значение угла):

$$\vartheta(t) = \vartheta_s\left(\frac{l}{2}, t\right) / (C_0 V \delta v_0 d / D). \quad (18)$$

Рассчитанная по формулам (16-18) зависимость угла от времени приведена на рис.2. Характерной особенностью полученной зависимости является «задержка» нелинейного отклика на малых временах.

Полученное в рамках данной модели выражение позволяет определять характеристики дисперсных наночастиц, что значительно расширяет возможности метода. Предложенная схема светоиндуцированной псевдо-призмы не требует наличия поглощения среды и поэтому свободна от обычно мешающего влияния тепловой конвекции [8-10].

Таким образом, в работе получено выражение для угла отклонения луча в светоиндуцированной псевдо-призме в прозрачной дисперсной среде (наножидкости). Полученные результаты актуальны для аналитической химии полимеров [1-5], а также для оптической диагностики дисперсных жидкофазных сред [6-10].

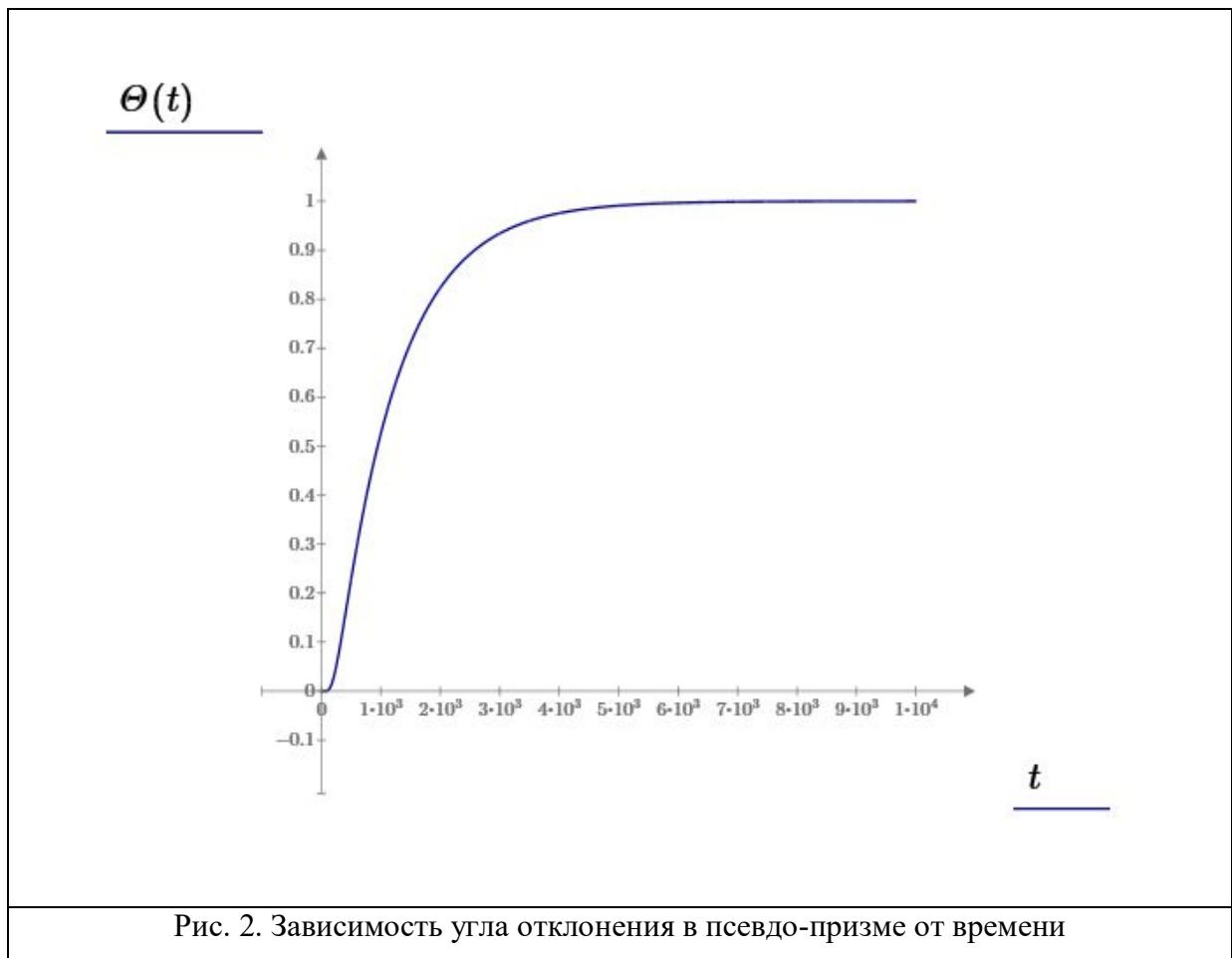


Рис. 2. Зависимость угла отклонения в псевдо-призме от времени

Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик в жидкофазной дисперсной среде// 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.
2. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И., Хе В.К. Динамика светоиндуцированной тепловой линзы в жидкофазной двухкомпонентной среде // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. —2011. —Т.4, №134. — С.44-46.
3. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. — 105 с.
4. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм самомодуляции излучения в среде с поглощающими наночастицами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. —Т.52, №12-3. — С.114-116.

5. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм самовоздействия излучения в среде с наночастицами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. — Т.52, №12-3. – С.117-119.
6. 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.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка // 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. 116-119.
8. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Том 51, № 3. – С. 50-53.
9. Иванов В.И., Окишев К.Н., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм просветления двухкомпонентной среды лазерным излучением // Известия Томского политехнического университета. — 2007. —Т. 311. — № 2. — С. 39-42.
10. Buzzaccaro S. Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions / S. Buzzaccaro, A. Tripodi, R. Rusconi, D. Vigolo, R. Piazza // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – Vol. 20. - № 49. – P. 494219.

Рецензенты:

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