

УДК 57.043

**СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЙ МАССОПЕРЕНОС НАНОЧАСТИЦ  
В ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЕ****Иванов В.И.***ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск,  
e-mail: ivanov@festu.khv.ru*

Известно использование светоиндуцированной термодиффузии для сортировка смесей макромолекул по размерам. В дисперсной среде существует специфический механизм оптической нелинейности, основанный на перераспределении концентрации частиц дисперсной среды в градиентном световом поле. В данной работе предлагается использовать как электрострикционный так и термодиффузионный эффекты для накопления наночастиц в световом пучке. Проведен теоретический анализ светоиндуцированного массопереноса в дисперсной жидкофазной среде для больших интенсивностях излучения в поле гауссова пучка, когда изменение концентрации больше или сравнимо с начальной. Показано, что концентрация наночастиц в световом пучке экспоненциально растет с увеличением интенсивности излучения. Электрострикционный и термодиффузионный вклады могут усиливать или ослаблять друг друга. Полученные результаты актуальны для разнообразных микрожидкостных технологи, а также для развития методов оптической диагностики материалов в биомедицине.

**Ключевые слова:** оптические ловушки, термодиффузия макромолекул, электрострикция**LIGHT INDUCED MASS TRANSPORT OF NANOPARTICLES IN LIQUID MEDIUM****Ivanov V.I.***Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: ivanov@festu.khv.ru*

It is known the light induced thermal diffusion is used for sorting mixtures of macromolecules. In the dispersed environment there is a specific mechanism of optical nonlinearity based on the redistribution of the dispersed particle concentration in the light gradient field. In this paper, it is suggested to use as electrostrictive and thermodiffusive effects for nanoparticles accumulation in the light beam. The theoretical analysis of the light-induced mass transfer in the dispersed liquid medium was carried out for large intensities of radiation in the Gaussian beam, when the concentration is greater than or comparable to the primary. It was showed that concentration of nanoparticles increases exponentially with the intensity of the light. Electrostrictive and thermodiffusive deposits can strengthen or weaken each other. The results are relevant to a variety of microfluidic technology, as well as for the development of methods of optical diagnostics of materials in biomedicine.

**Keywords:** optical traps, thermodiffusion of macromolecules, electrostriction

Технологии разделения биоматериалов (например, такие как электрофорез геля) являются неотъемлемой частью современной протеиновой биотехнологии. Тем не менее, электрофорез трудно миниатюризировать из-за электрохимических влияний поверхности раздела с металлом и трудоемкой подготовке фаз геля. Сравнительно недавно предложены новые подходы к управления биомолекулами, основанные на использовании оптических технологий. В ряде работ [ ] предложено использовать термофоретические движущие силы в миниатюризированных устройствах биотехнологии. Светоиндуцированная термодиффузия может быть использована для сортировка смесей макромолекул по размерам [13,14]. Таким образом, термофорез может быть важной новой биологически совместимой управляющей силой в микрожидкостных технологиях [13,14].

Недавняя работа многих лабораторий и исследователей пролила новый свет на механику термодиффузии полимеров, мицелл и протеинов в водных растворах [13,14]. Оптические эксперименты демонстрируют, что частицы микрометрического размера

могут быть значительно накоплены комбинацией термофореза и конвекции. Продemonстрировано, что сильное накопление частиц может привести к кооперации молекул. Температурные градиенты могут обеспечивать захват в ловушку макромолекул микронного размера с образованием коллоидных кристаллов [13,14]. Образованные кристаллы могут использоваться как молекулярные сита для микрожидкостных биотехнологических применений.

В недавних работах высказано предположение, что термодиффузия, возможно, играла существенную роль в молекулярной эволюции около гидротермальных источников [12]. Модельные эксперименты показывают, что температурные градиенты в мезопорах могут обеспечить механизмы для автономного молекулярного развития.

Термодиффузия не является единственным механизмом транспорта наночастиц. Известно, что в микрогетерогенной среде с различными показателями преломления компонентов на микрочастицы в электромагнитном поле действуют электрострикционные силы, которые могут быть причиной возникновения концентрационных потоков

[4]. В зависимости от знака поляризуемости микрочастицы могут втягиваться (если показатель преломления вещества дисперсионной фазы больше, чем дисперсионной среды) или выталкиваться (в обратном случае) из областей с большей напряженностью электрического поля электромагнитной волны. Концентрационная оптическая нелинейность исследовалась экспериментально и теоретически в различных средах – газах, суспензиях, микроэмульсиях [4–6].

Целью данной работы является теоретический анализ светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде с учетом термодиффузии и электрострикции в поле светового пучка при больших интенсивностях излучения, когда, в отличие от работы [5], изменение концентрации не обязательно мало.

**Модель среды**

Мы будем рассматривать жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности (рисунок).

Пусть распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды имеет гауссов вид (кювета находится в перетяжке гауссова пучка):

$$I = I_0 \exp(-r^2/r_0^2), \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность световой волны в центре пучка;  $r_0$  – радиус гауссова пучка.

Балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом термодиффузионного и электрострикционного потоков, можно записать в виде [5]:

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

$$c_p \rho \partial T / \partial t = -\text{div}J_1 + \alpha I_0 \exp(-r^2 / r_0^2). \quad (3)$$

$J_1$  и  $J_2$  – тепловой и концентрационный потоки соответственно:

$$J_1 = D_{11} \text{grad}T, \quad (4)$$

$$J_2 = -D_{21} C \text{grad}T - D_{22} \text{grad}C + \gamma C \nabla I, \quad (5)$$

где  $C(r,t)$  – объемная концентрация дисперсных частиц;  $D_{11}$  – коэффициент теплопроводности среды,  $D_{22}$  – коэффициент диффузии наночастиц,  $D_{21}$  – коэффициент термодиффузии,  $\gamma = b\mu$ ,  $b = \frac{4\pi\beta D}{\bar{c}nk_B T}$ ,  $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$  –

подвижность микрочастицы,  $a$  – размер частицы,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $\beta$  – поляризуемость частиц,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $n$  – эффективный показатель преломления среды,  $\bar{c}$  – скорость света в вакууме.

В стационарном режиме уравнение (2) упрощается:

$$-\text{div}J_1 + \alpha I_0 \exp(-r^2 / r_0^2) = 0. \quad (6)$$

$$-D_{21} C \text{grad}T - D_{22} \text{grad}C + \gamma C \nabla I = 0. \quad (7)$$

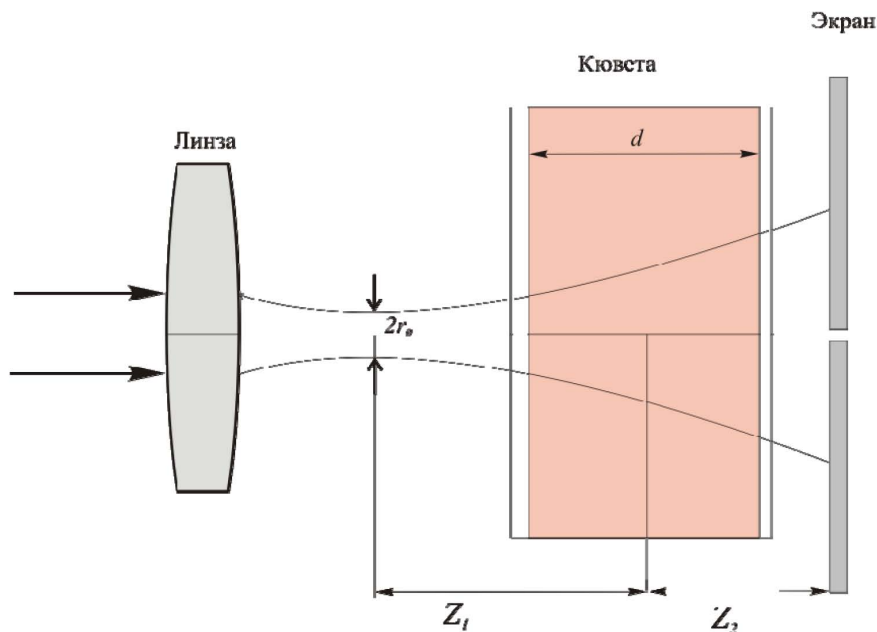


Рис. 1. Схема оптического эксперимента

Интегрируя уравнение (6), получаем

$$\nabla T = D_{11}^{-1} \alpha I_0 r_0^2 (1 - \exp(-r^2 / r_0^2)) / 2r. \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (7), имеем

$$\ln C = D_{22}^{-1} \int (-D_{21} C \text{grad} T - D_{22} \text{grad} C + \gamma C \nabla I) 2\pi r dr. \quad (9)$$

Общее решение уравнения (9) ищем в виде

$$C = B \exp(I / I_s), \quad (10)$$

где  $I_s = \gamma^{-1} D_{22}$  – интенсивность насыщения, при которой изменение концентрации становится сравнимым с начальной ее величиной,  $B$  – нормировочная константа. Введем безразмерный параметр интенсивности излучения  $\beta = \gamma I_0 D_{22}^{-1}$ . Для небольших изменений концентрации частиц (при большой интенсивности излучения) имеем  $\beta \gg 1$ . Константу  $B$  находим из условия нормировки

$$C(R) = C_0, \quad (11)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической кюветы,  $C_0$  – начальная концентрация наночастиц (считаем, что радиус светового пучка много меньше радиуса кюветы).

Решение уравнения (9):

$$C(r) = B \exp\{\beta + F(r - r_0 \text{erf}(r / r_0))\}, \quad (12)$$

$$B = \exp\{-\beta + F(R - r_0)\}, \quad (13)$$

$$F = S_T \alpha I_0 \pi r_0^3, \quad (14)$$

где  $\text{erf}(r / r_0)$  – табулированная функция ошибок,  $S_T = D_{12} / D_{22}$  – коэффициент Соре.

Для численных оценок можно использовать разложение функции ошибок:

$$\text{erf}(x) = \sum_0^{\infty} \frac{2(-1)^n x^{2n+1}}{n!(2n+1)\sqrt{\pi}}, \quad (15)$$

Данный результат показывает, что концентрация экспоненциально зависит от интенсивности.

Полученные результаты можно использовать для расчета разнообразных задач, связанных с оптическими методами манипулирования макромолекулами.

В частности из (12) видно, что электрострикционный вклад может как усиливать термодиффузионный эффект, так и ослаблять его. Знаки обоих эффектов определяются независимо друг от друга, поскольку электрострикционный эффект зависит от оптических параметров компонент, а термодиффузионный – от термодинамических характеристик смеси (и даже может менять

свой знак при изменении концентрации дисперсной фазы).

Оценки показывают, что уже при мощностях излучения около ватта (что соответствует доступным лазерным источникам непрерывного излучения), светоиндуцированное изменение концентрации наночастиц может достигать нескольких порядков от первоначальной.

### Заключение

Получено точное решение задачи светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде с учетом термодиффузии и электрострикции в поле светового пучка при больших интенсивностях излучения. Показано, что концентрация наночастиц экспоненциально зависит от интенсивности излучения. Анализ демонстрирует, что электрострикционный вклад может как усиливать термодиффузионный эффект, так и ослаблять его. Знаки обоих эффектов определяются независимо друг от друга, поскольку электрострикционный эффект зависит от оптических параметров компонент, а термодиффузионный – от термодинамических характеристик среды.

Светоиндуцированная термодиффузия может быть использована для сортировки смесей макромолекул по размерам [13,14], в разнообразных микрожидкостных биотехнологиях [13,14], а также для развития методов оптической диагностики материалов в биомедицине.

### Список литературы

1. Иванов В.И. Динамика светоиндуцированной тепловой линзы в жидкофазной двухкомпонентной среде / В.И. Иванов, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили, В.К. Хе // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. -2011. – Т.4; №134. – С.44–46.
2. Иванов В.И. Микрогетерогенные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, С.И. Кирушина, А.В. Мяготин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 2580–2583.
3. Иванов В.И. Нанодисперсные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. – 58. – № 11–3. – С. 153–156.
4. Иванов В.И. Оптическая диагностика полимерных наночастиц / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–6. – С. 1085–1088.
5. Иванов В.И. Перспективные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец // Вестник ДВО РАН. – 2003. – №1. – С. 93–97.

6. Иванов В.И. Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкофазной среде / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: [www.science-education.ru/120-17046](http://www.science-education.ru/120-17046).
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. – Том 5. – № 1. – С. 5–8.
8. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм: монография / В.И. Иванов. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 142 с.
9. Иванов, В.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып.5. – С. 116–119.
10. Иванова Г.Д. Динамические голограммы в жидкофазной дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–10. – С. 2164–2168.
11. Иванова Г.Д. Нелинейная линза в дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 1779.
12. Крылов В.И. Метод светоиндуцированной псевдо-призмы в наножидкости / В.И. Крылов, 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, 2015. – Вып. 7. – С. 329–332.
13. Braun D. Thermal force approach to molecular evolution / D. Braun, A. Libchaber // Phys. Biol. – 2004. -№1. – P.1–8.
14. Duhr S. Two-dimensional colloidal crystals formed by thermophoresis and convection / S. Duhr, D. Braun // Applied Physics Letters. – 2005. – V. 86. – P. 131921.
15. Ivanov V.I. Efficiency and dynamic range of nonlinear reflection of a four-wavelength mixture of radiation / V.I. Ivanov, S.R. Simakov // Russian Physics Journal. – 2001. – Vol. 44; № 1. – P. 117–118.