

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**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

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:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

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

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров 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.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

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

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственной
университет, 2019

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ЛИНЗА В ПРОЗРАЧНОЙ ПЛОТНОЙ НАНОСУСПЕНЗИИ

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

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
600021, Россия, Хабаровск, ул. Серышева, 47
tmeh@festu.khv.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.590

Аннотация: Рассмотрена концентрационная светоиндуцированная линза в прозрачной дисперсной среде при больших интенсивностях излучения с учетом взаимодействия (отталкивания) наночастиц. Показано, что зависимость светлинзового отклика от интенсивности излучения имеет максимум, обусловленный насыщением концентрации наночастиц в плотной наносуспензии.

Ключевые слова: светоиндуцированная линза, светлинзовый отклик, самовоздействие излучения, электрострикция, наносуспензия.

1. Введение

В прозрачной наносуспензии светоиндуцированная линза образуется за счет электрострикционного эффекта, который вызывает изменение концентрации наночастиц в неоднородном поле световой волны [1]. При малых интенсивностях излучения отклик среды соответствует кубичной нелинейности, поскольку изменение концентрации частиц (и, соответственно, эффективного показателя преломления среды) пропорционально интенсивности излучения [2]. Для высокой интенсивности излучения анализ приводит к так называемой экспоненциальной модели, когда изменение концентрации наночастиц нелинейно (экспоненциально) зависит от интенсивности излучения [3]. Обычно используемая модель невзаимодействующих наночастиц (модель идеального газа) приводит к существенному (на несколько порядков) увеличению концентрации наночастиц в области максимума интенсивности. Для сильноконцентрированных (плотных) наносуспензий в этих условиях нельзя пренебрегать эффектами взаимодействия наночастиц.

Целью данной работы является анализ концентрационной светоиндуцированной линзы пучка в прозрачной дисперсной среде при больших интенсивностях излучения с учетом взаимодействия (отталкивания) наночастиц.

2. Постановка задачи и обсуждение результатов

Рассмотрим образование тонкой линзы в нелинейной среде. В качестве последней используется прозрачная жидкофазная среда с наночастицами (дисперсная фаза), находящаяся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности [3].

Пусть распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды имеет гауссов вид $I = I_0 \exp(-r^2/r_0^2)$, 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 диффузионного и электрострикционного потоков ($J_{el} = \gamma C \nabla I$ – электрострикционный поток) в стационарном режиме упрощается [4]:

$$dC/dt = -\text{div}(-D\nabla C + \gamma C(1-\nu C)\nabla I) \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(r,t)$ – объемная концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии, $\gamma = \beta\mu$, $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – подвижность микрочастицы, a – радиус наночастицы, η – вязкость жидкости, β – поляризуемость наночастицы, ν – константа, учитывающая взаимодействие (отталкивание) наночастиц [3].

Решение уравнения (1) с учетом нормировки

$$C_{st} = C_0 \left(f_0 + \exp\{-\alpha \exp(-r^2/r_0^2)\} \right)^{-1} \quad (2)$$

где $\alpha = I_0/I_{th}$ – безразмерный параметр интенсивности, $I_{th} = D\gamma^{-1}$ – характерная интенсивность излучения, при превышении которой изменение концентрации наночастиц становится больше начального значения, $f_0 = 4\pi a^3 C_0 / 3$ – начальная объемная доля наночастиц, a – радиус наночастицы, $\nu = 1$ в простейшей модели жестких сфер.

Формула (2) показывает, что концентрация на оси пучка экспоненциально зависит от интенсивности только при малых начальных концентрациях.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости концентрации наночастиц (отнесенной к начальному значению концентрации) от расстояния до оси пучка ρ (приведенного к радиусу пучка). Видно, что для невысоких интенсивностей (вплоть до значений $\alpha = 1$) наличие отталкивания почти не сказывается на изменении концентрации наночастиц.

Для более высокой интенсивности лазерного пучка различие становится весьма существенным (см. рис. 2). Изменение концентрации существенно зависит от начальной объемной доли наночастиц.

Насыщение концентрации наночастиц на оси светового пучка влияет и на величину образованной нелинейной линзы.

Для оптической силы концентрационной линзы получаем из (2) выражение [5]:

$$D_{nl} = d(\partial n / \partial C)(\partial^2 C / \partial r^2) \quad (3)$$

где d – толщина слоя наносuspензии.

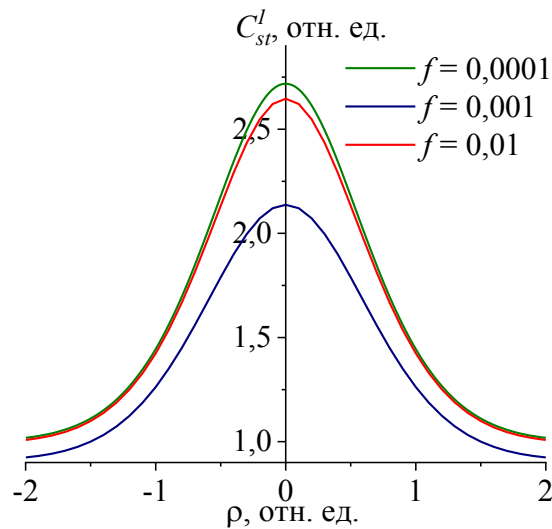


Рис. 1. Зависимость концентрации наночастиц C_{st}^l ($C_{st}^l = C_{st}/C_0$) от расстояния от оси пучка ρ (приведенного к радиусу пучка) для разных значений начальной объемной доли f_0 (интенсивность излучения $\alpha = 1$).

Используя выражения (3), получаем окончательно

$$D_{nl} = 2d\delta f_0 e^{-\alpha} (f_0 + e^{-\alpha})^{-2} / r_0^2, \quad (4)$$

где $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$, n_1 и n_2 – показатели преломления вещества дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно. Видно, что экспоненциальный рост концентрации (и величины линзы) с ростом интенсивности наблюдается только для малой концентрации наночастиц ($f_0 \ll 1$). На рис. 3 показаны зависимости D_{nl} от нормированной интенсивности для разных значений начальной концентрации наночастиц.

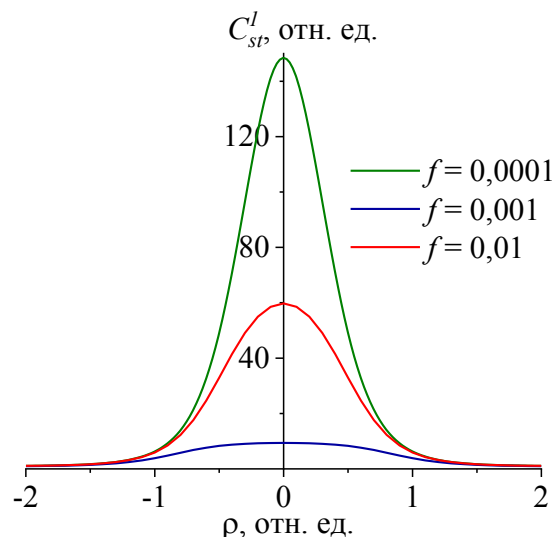


Рис. 2. Зависимость безразмерной концентрации наночастиц C_{st}^l ($C_{st}^l = C_{st}/C_0$) от расстояния от оси пучка ρ (приведенного к радиусу пучка) для разных значений начальной объемной доли f_0 (интенсивность излучения $\alpha = 5$).

В случае высокой начальной концентрации наночастиц зависимость величины линзы от интенсивности имеет максимум.

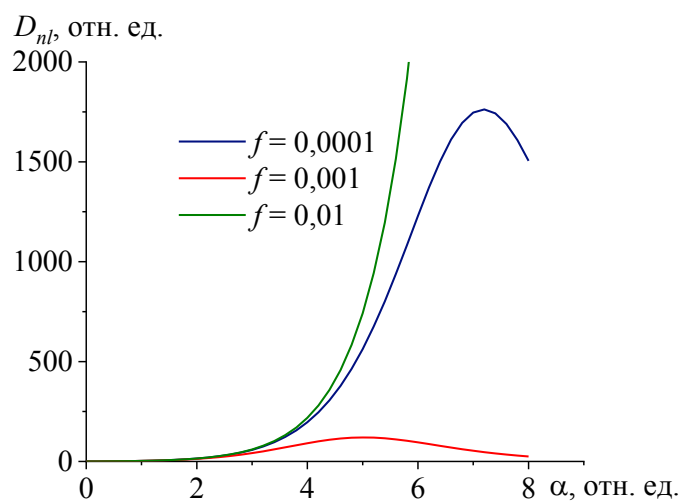


Рис. 3. Зависимость эффективной оптической силы D_{nl} нелинейной линзы (в отн. ед.) от интенсивности излучения α для разных значений начальной доли наночастиц f_0 .

3. Заключение

Приведено решение нелинейной стационарной задачи светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде под действием электрострикционных сил в поле гауссова пучка при больших интенсивностях излучения. Показано, что учет отталкивания наночастиц приводит к эффекту насыщения их концентрации в приосевой области светового пучка. Данный эффект насыщения проявляется в существовании максимума светлинзового отклика при увеличении интенсивности светового пучка. Полученные результаты актуальны для нелинейной оптики наносuspензий [5-7], а также для разработки методов оптической диагностики жидкофазных наноматериалов [8-11].

Библиографический список:

1. **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.
2. **Иванов, В.И.** Электрострикционный механизм светлинзового отклика в наносuspензии / В.И. Иванов, А.В. Мяготин, Г.Д. Иванова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 205-209.
3. **Lee, W.M.** Nonlinear optical response of colloidal suspensions / W.M. Lee, R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, K. Dholakia, E.M. Wright // Optics Express. – 2009. – V. 17. – I. 12. – P. 10277-10289.
4. **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.

5. **Иванов, В.И.** Термодиффузионный вклад в термолинзовый отклик наносuspензии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, А.В. Мяготин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 280-285.

6. **Ovseychook, O.O.** Fiber optics method for nanomaterials diagnostics / O.O. Ovseychook, 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.

7. **Иванов, В.И.** Светоиндуцированная термодиффузия наночастиц / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 135-138.

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. 039-042.

9. **Bialkowski, S.E.** Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis / S.E. Bialkowski. In: Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications. V. 134. – New York: Wiley-Interscience, 1996. – 584 p.

10. **Проскурнин, М.А.** Современная аналитическая термооптическая спектроскопия / М.А. Проскурнин, М.Ю. Кононец // Успехи химии. – 2004. – Т. 73. – Вып. 12. – С. 1235-1268.

11. **Недосекин, Д.А.** Возможности термооптических методов анализа в исследовании привитых молекулярных слоев на планарной поверхности стекол // Д.А. Недосекин, М.Ю. Кононец, М.А. Проскурнин, Т.Ю. Чайковский, Г.В. Лисичкин // Журнал аналитической химии. – 2007. – Т. 62. – № 2. – С. 142-152.

References:

1. **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.

2. **Ivanov, V.I.** Electrostriction mechanism of light induced lens response in nanosuspension / V.I. Ivanov, A.V. Myagotin, G.D. Ivanova a // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – I. 9. – P. 205-209. (In Russian).

3. **Lee, W.M.** Nonlinear optical response of colloidal suspensions / W.M. Lee, R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, K. Dholakia, E.M. Wright // Optics Express. – 2009. – V. 17. – I. 12. – P. 10277-10289.

4. **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.

5. **Ivanov, V.I.** Thermodiffusion contribution in the thermal lens response of the nanosuspension / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, A.V. Myagotin // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 280-285. (In Russian).

6. **Ovseychook, O.O.** Fiber optics method for nanomaterials diagnostics / O.O. Ovseychook, 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.

7. **Ivanov, V.I.** Light induced thermodiffusion of nanoparticles / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2016. – I. 8. – P. 135-138. (In Russian).

8. **Ivanov, V.I.** A Thermal lens spectroscopy of the two components media / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – № 4. – P. 39-42. (In Russian).
9. **Bialkowski, S.E.** Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis / S.E. Bialkowski. In: Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications. V. 134. – New York: Wiley-Interscience, 1996. – 584 p.
10. **Proskurnin, M.A.** Modern analytical thermo-optical spectroscopy // Russian Chemical Reviews. – 2004. – V. 73. – I. 12. – P. 1143-1172.
11. **Nedosekin, D.A.** Potential of thermo-optical methods for the study of molecular layers bonded to a flat glass surface / D.A. Nedosekin, M.Yu. Kononets, M.A. Proskurnin, T.Yu. Chaikovskii, G.V. Lisichkin // Journal of Analytical Chemistry. – 2007. – V. 62. – I. 2. – P. 126-135.

Short communication

LIGHT INDUCED LENS IN A TRANSPARENT DENSE NANOSUSPENSION

G.D. Ivanova, A.V. Myagotin, V.I. Ivanov

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.590

Abstract: The light-induced concentration lens in a transparent dispersive medium at high radiation intensity was analyzed taking into account the interaction (repulsion) of nanoparticles. It is shown that the dependence of the light-lens response versus the intensity of radiation has the maximum due to the saturation of concentration of nanoparticles in the dense nanosuspension.

Keywords: *light-induced lens, light-lens response, self-action of the radiation, electrostriction, nanosuspension.*

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

Мяготин Артем Владимирович – магистрант 2-го курса (направление «Фотоника и оптоинформатика») кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

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

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

Myagotin Artem Vladimirovich – undergraduate student (Direction «Photonics and optoinformatics»), Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

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

Поступила в редакцию/received: 15.10.2019; после рецензирования/revise: 04.11.2019; принята/accepted 20.11.2019.