Министерство образования и науки
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 9

ТВЕРЬ 2017

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 об 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, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

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 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной
университет, 2017

УДК 535.211

ЭЛЕКТРОСТРИКЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ СВЕТОЛИНЗОВОГО ОТКЛИКА В НАНОСУСПЕНЗИИ

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

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

600021, Россия, Хабаровск, ул. Серышева, 47

ivanov@festu.khv.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.205

Аннотация: Проведен теоретический анализ светоиндуцированного массопереноса в дисперсной жидкофазной среде для больших интенсивностей излучения в поле гауссова пучка. Нелинейная линза экспоненциально растет с увеличением интенсивности излучения, когда изменение концентрации больше или сравнимо с начальной. Показано, что при больших концентрациях наночастиц световая линза ограничена рэлеевским рассеянием.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, электрострикция, наносуспензия.

1. Введение

Термолинзовый метод широко используется для исследования нелинейных сред [1]. В двухкомпонентных жидкостях термолинзовый отклик имеет свои особенности из-за наличия концентрационной нелинейности [2]. Исследование данного типа нелинейности актуально как для прикладных задач нелинейной оптики дисперсных сред, так и для разработки нелинейно-оптических методов диагностики таких сред [3].

В микрогетерогенной среде с различными показателями преломления компонентов на микрочастицы в электромагнитном поле действуют электрострикционные силы, которые могут быть причиной возникновения концентрационных потоков [3]. При малых интенсивностях излучения отклик среды соответствует кубичной нелинейности, поскольку изменение концентрации частиц (и, соответственно, эффективного показателя преломления среды) пропорционально интенсивности излучения [4]. Решение соответствующей задачи светоиндуцированного массопереноса облегчается использованием линеаризованного уравнения диффузии [5]. Для больших интенсивностей излучения потенциальная энергия наночастицы в световом поле может превышать тепловую. При этом изменение концентрации наночастиц может значительно превышать ее первоначальное значение [6]. Поэтому данная задача требует решения нелинейного уравнения массопереноса. Мы предлагаем провести анализ концентрационной нелинейности для стационарного режима, допускающего точное решение нелинейной задачи. Поскольку значительное увеличение концентрации наночастиц приводит к соответствующему увеличению потерь на рэлеевское рассеяние, то представляет интерес исследование влияния этого фактора на нелинейный отклик среды.

Целью данной работы является анализ самовоздействия светового пучка в прозрачной дисперсной среде при больших интенсивностях излучения с учетом рэлеевского рассеяния излучения.

2. Постановка задачи и обсуждение результатов

Аналогично обычной термолинзовой схеме 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 [7]:

$$D \nabla^2 C - \text{div}(\gamma C \nabla I) = 0. \quad (1)$$

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.

Общее решение уравнения (1) ищем в виде

$$C = B \exp\{I/I_s\}, \quad (2)$$

где $I_s = \gamma^{-1} D$, B – константа, которую находим из условия нормировки (сохранения числа частиц).

Введем безразмерный параметр интенсивности излучения $\alpha = I_0 \gamma D^{-1}$. Для существенных по сравнению с начальным значением изменений концентрации частиц (при большой интенсивности излучения) имеем $\alpha \gg 1$.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости концентрации наночастиц (отнесенной к начальному значению концентрации) от расстояния до оси пучка ρ (приведенного к радиусу пучка). Данный результат показывает, что концентрация экспоненциально зависит от интенсивности (в отличие от обычной кубичной нелинейности) [5].

Для оптической силы концентрационной линзы получаем из (2) выражение [6]:

$$F_{nl} = 2d(\partial n / \partial C) C_o \Delta C_{st}, \quad (3)$$

$$\Delta C_{st} = B \exp \alpha - 1, \quad (4)$$

где d – толщина слоя наносuspензии, C_o – начальная концентрация наночастиц.

Рис. 1. Зависимость концентрации наночастиц C_{st} (в отн. ед.) от расстояния от оси пучка ρ для разных значений интенсивности излучения α : (1) – $\alpha=0,5$, (2) – $\alpha=1$, (3) – $\alpha=2$.

Светолинзовый отклик наблюдают, измеряя прошедшую кювету интенсивность на оси пучка, которая для малых нелинейностей пропорциональна оптической силе нелинейной линзы [6]. При больших концентрациях наночастиц становится существенным рэлеевское рассеяние излучения.

Введем эффективную оптическую силу нелинейной линзы, учитывающую потери излучения на рассеяние:

$$F_{nl}^{eff} = F_{nl} \exp \{-\alpha_R d\}, \quad (5)$$

где α_R – коэффициент рэлеевского рассеяния рассчитывается по формуле:

$$\alpha_R = 32\pi^2 \frac{(m-1)^2}{(m+2)^2} \cdot \frac{\Phi a^3}{\lambda^4}. \quad (6)$$

Коэффициент рэлеевского рассеяния пропорционален концентрации частиц (или объемной доле Φ), m – относительный показатель преломления наночастицы, λ – длина волны падающего излучения.

На рис. 2 показаны зависимости F_{nl}^{eff} от нормированной интенсивности для разных значений начальной концентрации наночастиц (или начального уровня потерь на светорассеяние). Видно, что первоначальный экспоненциальный рост нелинейного отклика для больших концентраций сменяется падением из-за потерь на рассеяние.

Рис. 2. Зависимость эффективной оптической силы F_{nl}^{eff} нелинейной линзы (в отн. ед.) от интенсивности излучения α для разных значений начального уровня потерь на светорассеяние: (1) – $\alpha_{1R} = 10^{-1}d$, (2) – $\alpha_{2R} = 10^{-2}d$, (3) – $\alpha_{3R} = 10^{-3}d$.

3. Заключение

Получено точное решение стационарной задачи светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде под действием электрострикционных сил в поле гауссова пучка при больших интенсивностях излучения. Показано, что концентрация наночастиц на оси пучка экспоненциально зависит от интенсивности падающего излучения. Диапазон экспоненциального роста нелинейного отклика с увеличением интенсивности излучения ограничен возрастанием рэлеевских потерь на рассеяние.

Полученные результаты актуальны для нелинейной оптики дисперсных жидкофазных сред [7], а также для оптической диагностики таких сред [8].

Библиографический список:

1. **Гришко, В.И.** Лазерная аналитическая термооптическая спектрометрия / В.И. Гришко, В.П. Гришко, И.Г. Юделевич. – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 1992. – 327 с.
2. **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.
3. **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.
4. **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.

5. **Иванова, Г.Д.** Нелинейная линза в дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Часть 1. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19194>.
6. **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.
7. **Сухоруков, А.П.** Дифракция световых пучков в нелинейных средах / А.П. Сухоруков // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 5. – С. 85-92.
8. **Зельдович, Б.Я.** Обращение волнового фронта / Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
9. **Иванов, В.И.** Голографическая чувствительность наногетерогенной среды с размытым фазовым переходом / В.И. Иванов, С.Р. Симаков // 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. 216-219.
10. **Проскурнин, М.А.** Современная аналитическая термооптическая спектроскопия / М.А. Проскурнин, М.Ю. Кононец // Успехи химии. – 2004. – Т. 73. – № 12. – С. 1235-1268.