

НЕЛИНЕЙНАЯ ЛИНЗА В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В.

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

В дисперсной среде существует специфический механизм оптической нелинейности, основанный на перераспределении концентрации частиц дисперсной среды в градиентном световом поле. Для малых интенсивностей излучения потенциальная энергия частиц в световом поле меньше тепловой и изменение концентрации частиц пропорционально интенсивности и мало по сравнению с начальной. При этом описание нелинейно-оптических эффектов можно проводить в рамках обычного кубического нелинейного отклика среды. Для более высоких интенсивностей необходимо решать уравнения массопереноса в световом поле. В данной работе проведен теоретический анализ светоиндуцированного массопереноса в дисперсной жидкофазной среде для больших интенсивностей излучения в поле гауссова пучка, когда изменение концентрации больше или сравнимо с начальной. Показано, что самовоздействие излучения происходит в существенно нелинейном режиме. Нелинейная линза в этом режиме экспоненциально растет с увеличением интенсивности излучения. Полученные результаты актуальны при исследовании самовоздействия излучения в дисперсных жидкофазных средах, а также для оптической диагностики таких сред, в т.ч. термооптической спектроскопии.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, электрострикция, дисперсная среда.

A NON-LINEAR LENS IN A DISPERSED MEDIUM

Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Mjagotin A.V.

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

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. For small intensities of radiation potential energy of the particles in the light field is less than the heat and the change of the particles concentration is proportional to the intensity and low in the comparison with the initial. In this case the description of the nonlinear optical effects can be carried out in the frame of the normal cubic nonlinear response of medium. For higher intensities it is need to solve the equations of mass transfer in the light field. In this paper 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 a radiation self-action occurs in significantly non-linear mode. The non-linear lens in this mode increases exponentially with the intensity of the light. The results are relevant in the study of the radiation self-action in dispersed liquid media, as well as optical diagnostics of such materials, including the thermo-spectroscopy.

Keywords: radiation self-action, electrostriction, dispersion medium.

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 дисперсной фазы больше, чем дисперсионной среды) или выталкиваться (в обратном случае) из областей с большей напряженностью электрического поля электромагнитной волны.

Электрострикционная сила может достигать больших величин уже при интенсивности падающего излучения в несколько *mWt*. Например, экспериментально наблюдалось однолучевое удержание (левитация) диэлектрических частиц (стекло) размером до 10 мкм в

воде в луче аргонового лазера ($\lambda = 0,514 \text{ мкм}$, $P=100 \text{ мВт}$), что свидетельствует об эффективности электрострикционных сил. Концентрационная оптическая нелинейность исследовалась экспериментально и теоретически в различных средах – газах, суспензиях, микроэмульсиях [4–6]. При малых интенсивностях излучения отклик среды соответствует кубичной нелинейности, поскольку изменение концентрации частиц (и, соответственно, эффективного показателя преломления среды) пропорционально интенсивности излучения. Данный тип нелинейности использовался для записи динамических голограмм, исследовалась самофокусировка излучения [4–5].

Целью данной работы является теоретический анализ самовоздействия светового пучка в прозрачной дисперсной среде при больших интенсивностях излучения, когда, в отличие от работы [5], изменение концентрации не обязательно мало.

Мы будем рассматривать жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности [5].

Пусть распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды имеет гауссов вид

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

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 диффузионного и электрострикционного потоков ($J_{el} = \gamma C \nabla I$ – электрострикционный поток), можно записать в виде [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \text{div}(\gamma C \nabla I). (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(r, t)$ – объёмная концентрация дисперсных частиц,

D – коэффициент диффузии, $\gamma = b\mu$, $b = \frac{4\pi\beta D}{\bar{c}nk_B T}$, $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – подвижность микрочастицы,

a – размер частицы, η – вязкость жидкости, β – поляризуемость частиц, k_B – постоянная

Больцмана, n – эффективный показатель преломления среды, \bar{c} – скорость света в вакууме.

В стационарном режиме уравнение (2) упрощается:

$$-D \nabla^2 C + \gamma C \nabla I = 0. (3)$$

Общее решение уравнения (3) ищем в виде

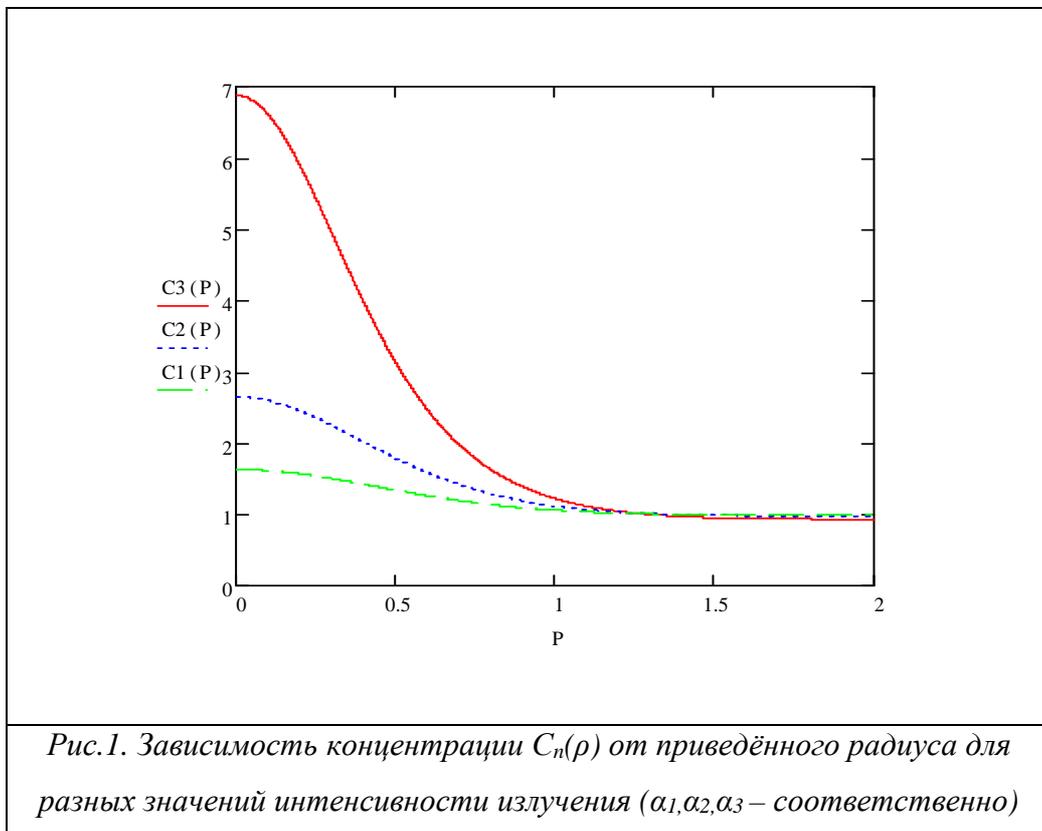
$$C = V \exp\{I/I_s\}, (4)$$

где $I_s = \gamma D^{-1}$, B – нормировочная константа. Введем безразмерный параметр интенсивности излучения $\alpha = \mathcal{I}_0 D^{-1}$. Для немалых изменений концентрации частиц (при большой интенсивности излучения) имеем $\alpha \gg 1$. Константу B находим из условия нормировки (сохранения числа частиц)

$$\int_0^R C 2\pi r dr = \pi R^2 C_0, \quad (5)$$

где R – радиус цилиндрической кюветы.

Принимая $R/r_0 = 5$, в результате численного расчета имеем: при $\alpha_1=0.5$ ($B_1=0.989$); при $\alpha_2=1$ ($B_2=0.974$); при $\alpha_3=2$ ($B_3=0.931$). Используя (4–5), получаем зависимость концентрации от приведенного расстояния от оси кюветы $p = r/r_0$ (рис.1).



Данный результат показывает, что концентрация экспоненциально зависит от интенсивности (в отличие от обычной кубичной нелинейности) [1–6].

Для оптической силы концентрационной линзы имеем из (4–5) выражение [2]:

$$D_l = \Delta \alpha \epsilon r \alpha, \quad (8)$$

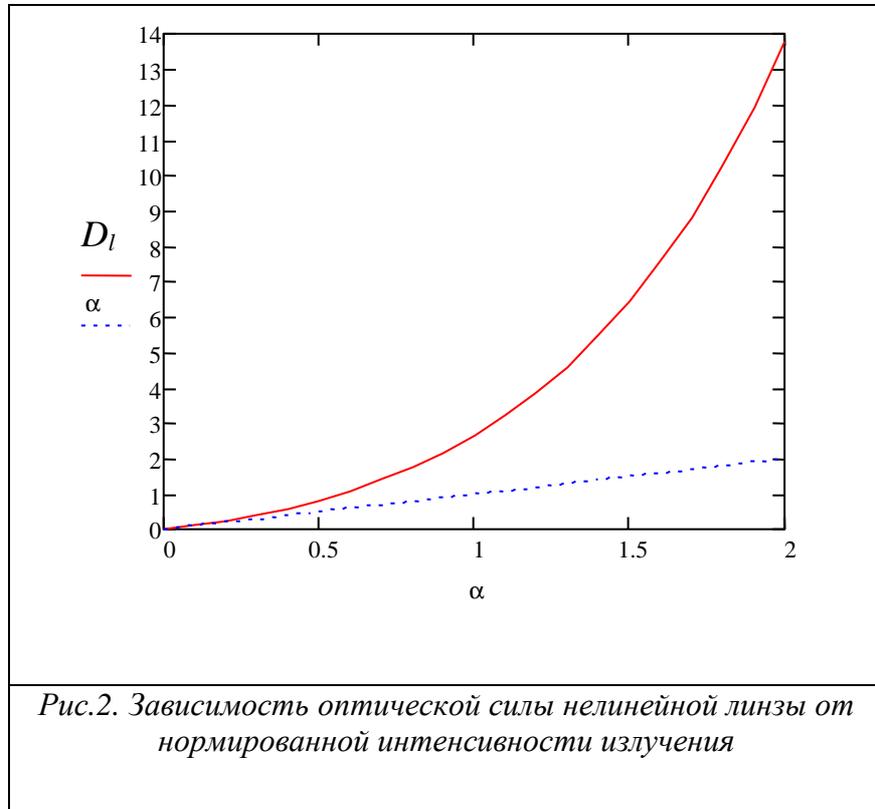
где $\Delta = 2d (\partial n / \partial C) C_0 r_0^{-2}$.

Для частиц с радиусом, много меньшим длины волны излучения λ , показатель преломления среды пропорционален концентрации частиц [5]:

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

где $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$; n_1 , n_2 – показатели преломления вещества дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно, $\phi = (4/3)\pi a^3 C$ – объемная доля дисперсной среды.

Поскольку фокус линзы растет экспоненциально, то справедливо назвать ее «суперлинзой».



Максимальная интенсивность, I_{\max} для которой выполняется (3), соответствует $C_{\max} = V_0^{-1}$, где V_0 – объем одной частицы (т.е. объемная доля частиц $\Phi = 1$),

$$I_{\max} = I_s \ln \Phi_0^{-1}, \quad (9)$$

где Φ_0 – начальная объемная доля частиц, $I_s = \gamma^{-1} D$ – интенсивность насыщения, при которой изменение концентрации становится сравнимым с начальной ее величиной. Поскольку обычно $\Phi_0 \ll 1$, то максимальная интенсивность может быть намного больше интенсивности насыщения, что представляет особенный интерес для импульсных режимов взаимодействия излучения с дисперсными средами [5–8].

Полученные результаты актуальны для нелинейной оптики дисперсных жидкофазных сред [2–6], а также для оптической диагностики таких сред (например, для термооптической спектроскопии [7–10]).

Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик жидкофазной дисперсной среды // 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., Иванова Г.Д., Хе В.К. Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкофазной среде // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.
3. 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.
4. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 105 с.
5. 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.
6. 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.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 50-53.
8. 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.
9. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости // 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, 2014. – Вып. 6. – С. 227-230.
10. Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм нелинейного поглощения суспензии наночастиц / К.Н. Окишев, В.И. Иванов, С.В. Климентьев, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 2. – С. 106-107.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск;

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения Министерства транспорта РФ, г. Хабаровск.