

УДК 05.17.06

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НАНОЖИДКОСТЕЙ**Кирюшина С.И., Мяготин А.В.***ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск,
e-mail: tmeh@festu.khv.ru*

Метод нелинейной линзы широко используется в аналитической химии для оптической диагностики материалов. 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. оптической спектроскопии.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, электрострикция, дисперсная среда**A NONLINEAR OPTICAL DIAGNOSTICS OF NANO-LIQUIDES****Kirjushina S.I., Mjagotin A.V.***Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: tmeh@festu.khv.ru*

Nonlinear lens technique is widely used for the optical diagnostics of materials in the analytical chemistry. 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 optical spectroscopy.

Keywords: radiation self-action, electrostriction, dispersion medium

В различных химико-технологических процессах широко используются оптические методы бесконтактного контроля. Особенно актуальны эти методы в химии полимеров для диагностики характеристик наноразмерных частиц. Нелинейно-оптическая диагностика наноматериалов основана на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды. В наногетерогенной среде с различными показателями преломления компонентов на микрочастицы в электромагнитном поле действуют электрострикционные силы, которые могут быть причиной возникновения концентрационных потоков [1–4]. 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.

Целью данной работы является теоретический анализ светлинзового отклика 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].

Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости, перпендикулярной оптической оси z :

$$I = I_0 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2 \right)^{-1} \exp(-r^2(z)/r_1^2(z)), \quad (1)$$

где $r_1(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2}$ – радиус пучка на расстоянии z от перетяжки, r – расстояние

от оси пучка, λ – длина волны излучения, r_0 – радиус пучка в перетяжке, I_0 – интенсивность излучения на оси в плоскости перетяжки 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]:

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

Здесь приняты следующие обозначения: $C(r, t)$ – объёмная концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии, $\gamma = b, \mu$, $b = \frac{4\pi\beta D}{\bar{c} n k_B T}$, $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – 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:

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

Общее решение уравнения (3) ищем в виде

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

где $I_s = \gamma D^{-1}$, B – нормировочная константа. Данный результат показывает, что концентрация экспоненциально зависит от интенсивности (в отличие от обычной кубической нелинейности) [1–6]. Введем безразмер-

ный параметр интенсивности излучения $\alpha = \gamma I_0 D^{-1}$. 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.

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

$$D_l = \Delta \alpha \epsilon \rho \alpha, \quad (6)$$

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]:

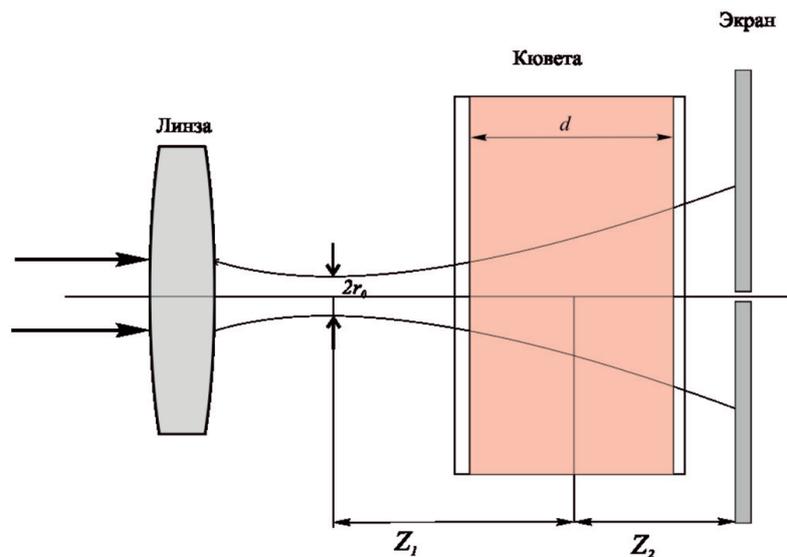
$$n = n_1 (1 + \Phi \delta), \quad (7)$$

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

Для расчета светлинзового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [1]:

$$T = 1 - \frac{2(z_1/l_0)\Phi_n(0)}{(1+z_1^2/l_0^2)(1+3z_1^2/l_0^2)} \quad (8)$$

где $\Phi_n(0)$ – нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка.



Однолучевая схема нелинейно-оптического эксперимента

Используя (6–8), можем получить для стационарного значения нелинейного набега фазы:

$$\Phi_{nl}(0) = dD_l r_0^2. \quad (9)$$

Полученное выражение позволяет определить концентрацию дисперсных наночастиц по светлинзовому отклику (8).

Заключение

Таким образом, в работе получено выражение для стационарного светлинзового отклика прозрачной дисперсной среды (наножидкости). Полученные результаты актуальны для разработки методов бесконтактного оптического контроля дисперсных сред в различных химико-технологических процессах [7–10].

Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термлинзовый 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. – Т. 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. 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.