

УДК 53.087:538.93

Краткое сообщение

Голографический метод диагностики наночастиц в плотных наносuspensionях

В.И. Иванов, А.В. Мяготин

*ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»
680021, Россия, Хабаровский край, Хабаровск, ул. Серышева, 47
valivi@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.128

Аннотация: Проанализирована эффективность записи динамических голограмм в дисперсных жидкофазных средах с высокой концентрацией наночастиц. Оптическая нелинейность среды обусловлена электрострикционными силами, действующими на частицы дисперсной фазы в градиентном световом поле. Массоперенос рассмотрен в случае надтепловых интенсивностей излучения, когда светоиндуцированное изменение концентрации наночастиц больше первоначальной и достигает насыщения. Показано, что при высоких уровнях интенсивности излучения запись динамической голограммы осуществляется в существенно нелинейном режиме, когда фазовая решетка становится несинусоидальной. При этом амплитуда первой гармоники резко возрастает с увеличением интенсивности, что позволяет добиться значительного повышения эффективности записи голограмм. Полученные результаты актуальны для динамической голографии дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред.

Ключевые слова: электрострикция, кубичная нелинейность, наносuspензия, динамические голограммы, надтепловая интенсивность излучения, оптическая диагностика.

Методы нелинейной оптики широко используются для оптической диагностики наноматериалов. В основе таких методов лежат различные светоиндуцированные механизмы оптической нелинейности. В наносuspензиях такие механизмы могут обеспечиваться светоиндуцированными потоками, вызывающими перераспределение концентрации дисперсных частиц. Эти потоки могут быть обусловлены термодиффузией или электрострикционными силами [1-4]. В последнем случае нелинейность проявляется даже в прозрачной дисперсной среде. Запись и считывание динамических голограмм на основе такого концентрационного механизма кубичной нелинейности исследовалась теоретически и экспериментально [5-8]. Обычно анализ нелинейного отклика в такой среде ограничивается случаем слабой интенсивности излучения, однако современные источники непрерывного излучения позволяют достичь и надтепловых режимов облучения, при которых изменение концентрации наночастиц нельзя считать малым [9].

В данной работе анализируется дифракционная эффективность динамических голограмм при относительно больших интенсивностях излучения, когда изменение концентрации может быть больше или сравнимо с начальной.

Рассматривается наносuspензия, представляющая собой прозрачную

жидкофазную среду с непоглощающими наночастицами. Простейшая голограмма создается двумя когерентными пучками света с плоскими волновыми фронтами. В таком случае пространственное распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды принимает следующий вид:

$$I(x) = I + I \cos Kx, \quad -\infty < x < \infty, \quad (1)$$

где I – интенсивность световой волны, $K = 2\pi / \Lambda$ – волновой вектор интерференционной решетки, Λ – ее период, x – координата в плоскости слоя среды. Распределение концентрации наночастиц в пространстве зависит от решения уравнения диффузии при наличии внешнего поля [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \operatorname{div}(\gamma C(1 - C) \nabla I), \quad (2)$$

где $C(x, t)$ – объемная доля нанофазы, D – коэффициент диффузии, $\gamma = \frac{4\pi\beta D}{\bar{c}k_B T}$, β – поляризуемость наночастицы, k_B – постоянная Больцмана, n – эффективный показатель преломления среды, $\bar{c}$ – скорость света в вакууме.

При малых интенсивностях излучения изменение концентрации наночастиц незначительно по сравнению с исходной концентрацией. В то же время амплитуда модуляции концентрации наночастиц прямо пропорциональна интенсивности излучения, что соответствует обычному случаю кубической нелинейности среды с коэффициентом $n_2 = (\partial n / \partial I)$.

Когда концентрация частиц значительно изменяется, можно проанализировать уравнение (2) в стационарном состоянии:

$$-D \nabla^2 C + \gamma C(1 - C) \nabla I = 0. \quad (3)$$

Введем безразмерный параметр $\alpha = I / I_s$, который демонстрирует, насколько интенсивность превышает уровень интенсивности насыщения $I_s = \gamma^{-1} D$ («тепловая» интенсивность), при которой изменения концентрации становятся сопоставимыми с её начальным значением.

Общее решение уравнения (3), описывающее зависимость концентрации частиц от приведённой координаты $y = Kx$:

$$C(y) = B e^{\alpha \cos y} (1 + B e^{\alpha \cos y})^{-1}. \quad (4)$$

где B – это константа, которая определяется с учетом условия сохранения числа частиц.

$$\int_0^\Lambda C dx = \Lambda C_0. \quad (5)$$

Дальнейшее вычисление амплитуды концентрационных решеток с использованием формулы (4-5) было выполнено в Mathcad. Были получены зависимости для различных интенсивностей излучения ($\alpha_1 = 0,2$; $\alpha_2 = 1$; $\alpha_3 = 5$) в наносuspensions с различной начальной концентрацией

наночастиц (см. рис. 1, 2).

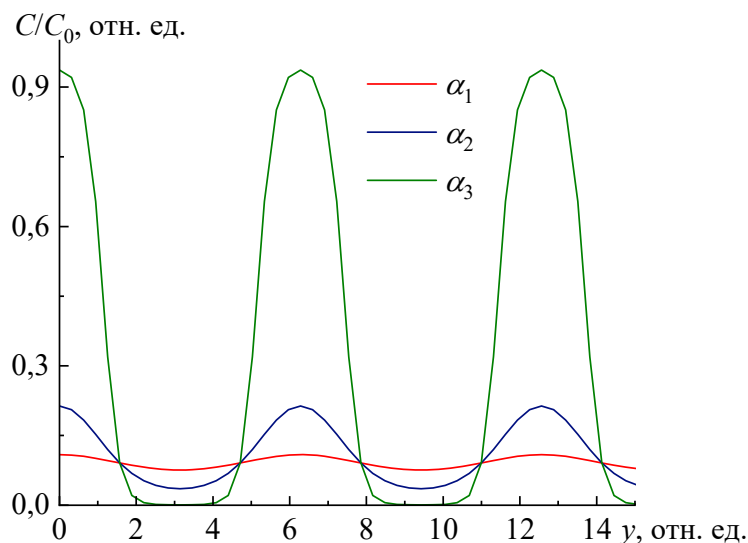


Рис. 1. Зависимость концентрации от приведенной координаты для $C_0 = 0,1$.

Видно, что при высоких уровнях интенсивности излучения запись динамической голограммы осуществляется в существенно нелинейном режиме, когда фазовая решетка становится несинусоидальной.

Для частиц с радиусом, много меньшим длины волны излучения π , показатель преломления среды пропорционален концентрации частиц [1]:

$$n = n_1(1 + \Phi\delta), \quad (6)$$

где $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$, $\Phi = \nu_0 C$ – объемная доля дисперсной среды, $\nu_0 = (4/3)\pi a^3$ – объем одной наночастицы.

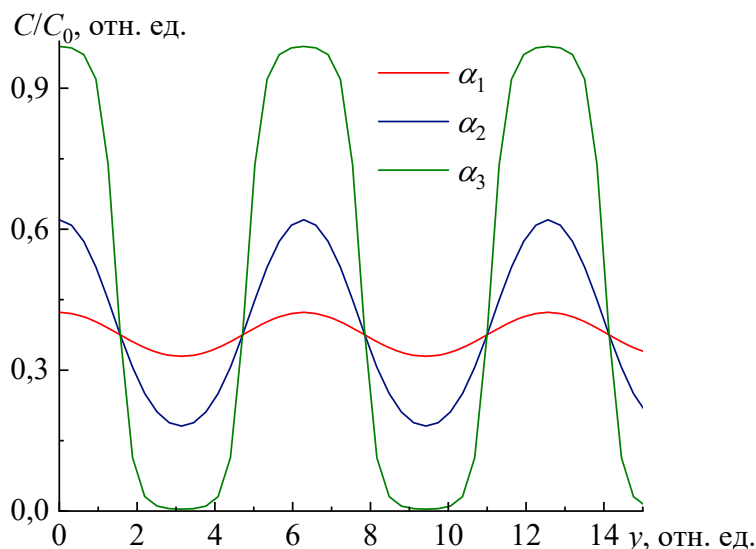


Рис. 2. Зависимость концентрации от приведенной координаты для $C_0 = 0,5$.

Для тонких фазовых голограмм дифракционная эффективность

находится как [3]:

$$\eta = t_0^2 J_1^2(\phi_1), \quad (7)$$

где t_0 – амплитудное пропускание неосвещенной голограммы, ϕ_1 – амплитуда фазовой модуляции прошедшего излучения, J_n – бесселева функция n -го порядка.

Если среда прозрачна и амплитуда фазовой модуляции мала ($\phi \ll 1$), из (6)-(7) для 1-й гармоники получаем:

$$\eta = \{2\pi n_1 f_0 \delta L C_1 \lambda^{-1}\}^2, \quad (8)$$

где L – толщина слоя среды.

Зависимость амплитуды концентрационной решетки от приведенной интенсивности показана на рис. 3.

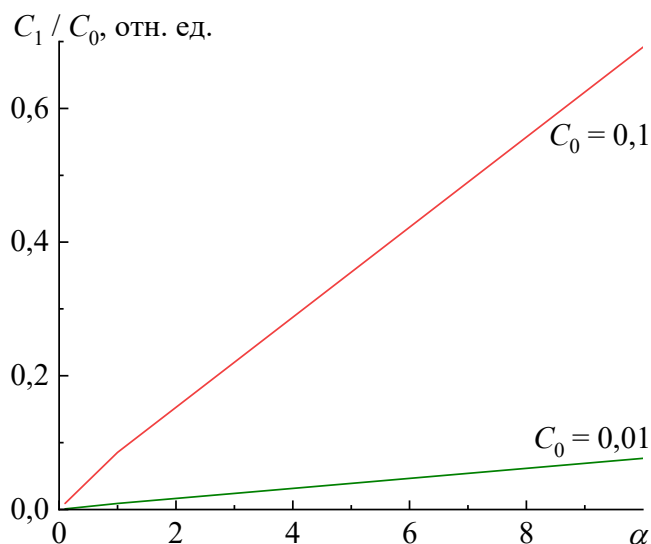


Рис. 3. Зависимость амплитуды концентрационной решетки от приведенной интенсивности.

Таким образом, показано, что при высоких уровнях интенсивности излучения запись динамической голограммы осуществляется в существенно нелинейном режиме, когда фазовая решетка становится несинусоидальной. При этом амплитуда первой гармоники резко возрастает с увеличением интенсивности, что позволяет добиться значительного повышения эффективности записи голограмм. В этом случае максимальная интенсивность может превышать интенсивность насыщения, что представляет особый интерес для импульсных режимов записи голограмм в дисперсных средах.

Полученные результаты позволяют повысить точность и эффективность методов оптической диагностики наноматериалов [8-12].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Хабаровского края Российской Федерации в рамках гранта (98С/2024) в области

научно-исследовательской деятельности.

Библиографический список:

1. Lee, W. Nonlinear optical response of colloidal suspensions / R. El-Ganainy, D. Christodoulides, K. Dholakia, E. Wright // *Optics Express*. – 2009. – V. 17. – I. 12. – P. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
2. Ivanov, V. A thermal lens response of the two components liquid in a thin him cell / V. Ivanov, G. Ivanova // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia. – 2016. – V. 735. – Art. № 012037. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012037.
3. Vicary, L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // *Philosophical Magazine B*. – 2002. – V. 82. – I. 4. – P. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
4. Ivanov, V.I. Thermal lens response in the two-component liquid layer / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // *Proceedings of the SPIE*. – 2015. – V. 9680. – Art. № 968042. – 4 p. DOI: 10.1117/12.2205722.
5. Ivanov, V.I. The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia. – 2016. – V. 735. – Art. № 012013. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012013.
6. Pai, C. Non-linear optical studies of colloidal nanofluids / C. Pai, M. Shalini, P. Agnel et al. // *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. – 2014. – V. 3. – №. 5. – P. 44-51.
7. Myagotin, A.V. Transient gratings in the transparent nanoliquid / A.V. Myagotin, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova // *Proceedings of the SPIE*. – 2017. – V. 10176. – Art. № 101761Z. – 6 p. DOI: 10.1117/12.2268272.
8. Pai, C. Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic nanofluids / C. Pai, H. Muthurajan, N. Momin, M. Shalini, S. Radha // *ScienceJet*. – 2015. – V. 4. – Art. № 114. – 6 p.
9. El-Ganainy, R. Optical beam instabilities in nonlinear nanosuspensions // R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, Z.H. Musslimani et al. // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32. – I. 21. – P. 3185-3187. DOI: 10.1364/OL.32.003185.
10. Pobegalov, G. Low-power optical bistability and hysteresis in the laser system with absorbing nanosuspension / G. Pobegalov, P. Agruzov, I. Ilichev, A. Shamray // *Optics Letters*. – 2014. – V. 39. – I. 9. – P. 2819-2822. DOI: 10.1364/OL.39.002819.
11. El-Ganainy, R. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions / R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, C. Rotschild, M. Segev // *Optics Express*. – 2007. – V. 15. – I. 16. – P. 10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.
12. Kelly, T.S. Guiding and nonlinear coupling of light in plasmonic nanosuspensions / T.S. Kelly, Y.-X. Ren, A. Samadi et al. // *Optics Letters*. – 2016. – V. 41. – I. 16. – P. 3817-3820. DOI: 10.1364/OL.41.003817.

References:

1. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Wright E. Nonlinear optical response of colloidal suspensions, *Optics Express*, 2009, vol. 17, issue 12, pp. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
2. Ivanov V., Ivanova G. A thermal lens response of the two components liquid in a thin him cell, *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia, 2016, vol. 735, art. no. 012037, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012037.
3. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion, *Philosophical Magazine B*, 2002, vol. 82, issue 4, p. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
4. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Thermal lens response in the two-component liquid layer, *Proceedings of the SPIE*, 2015, vol. 9680, art. no. 968042, 4 p. DOI: 10.1117/12.2205722.
5. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Mjagotin A.V. The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media, *Journal of Physics: Conference Series, International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics-2015»*, 12-16 October 2015, St. Petersburg, Russia, 2016, vol. 735, art. no. 012013, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012013.
6. Pai C., Shalini M., Agnel P. et. al. Non-linear optical studies of colloidal nanofluids, *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2014, vol. 3, no. 5, pp. 44-51.
7. Myagotin A.V., Ivanov V.I., Ivanova G.D. Transient gratings in the transparent nanoliquid, *Proceedings of the SPIE*, 2017, vol. 10176, art. no. 101761Z, 6 p. DOI: 10.1117/12.2268272.
8. Pai C., Muthurajan H., Momin N., Shalini M., Radha S. Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic

nanofluids, ScienceJet, 2015, vol. 4, art. № 114, 6 p.

9. El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Musslimani Z.H. et al. Optical beam instabilities in nonlinear nanosuspensions, *Optics Letters*, 2007, vol. 32, issue 21, pp. 3185-3187. DOI: 10.1364/OL.32.003185.

10. Pobegalov G., Agruzov P., Ilichev I., and Shamray A. Low-power optical bistability and hysteresis in the laser system with absorbing nanosuspension, *Optics Letters*, 2014, vol. 39, issue 9, pp. 2819-2822. DOI: 10.1364/OL.39.002819.

11. El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Rotschild C., Segev M. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions, *Optics Express*, 2007, vol. 15, issue 16, pp.10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.

12. Kelly T.S., Ren Y.-X., Samadi A. et al. Guiding and nonlinear coupling of light in plasmonic nanosuspensions, *Optics Letters*, 2016, vol. 41, issue 16, pp. 3817-3820. DOI: 10.1364/OL.41.003817.

Short Communication

The holographic method for diagnostics of nanoparticles in dense nanosuspensions

V.I. Ivanov, A.V. Myagotin

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.128

Abstract: The efficiency of the recording dynamic holograms in dispersed liquid-phase media with a high concentration of nanoparticles is analyzed. The optical nonlinearity of the medium is due to the electrostriction forces acting on the particles of the dispersed phase in a gradient light field. Mass transfer is considered in the case of suprathreshold radiation intensities, when the light-induced change in the concentration of nanoparticles is greater than the initial one and reaches saturation. It is shown that at high levels of the radiation intensity, the recording of a dynamic hologram is carried out in a significantly nonlinear mode, when the phase lattice becomes non-sinusoidal. At the same time, the amplitude of the first harmonic increases sharply with increasing intensity, which makes it possible to achieve a significant increase in the efficiency of the hologram recording. The results obtained are relevant for dynamic holography of dispersed liquid-phase media, as well as for optical diagnostics of such media.

Keywords: *electrostriction, cubic nonlinearity, nanosuspension, dynamic holograms, suprathreshold radiation intensity, optical diagnostics.*

Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»

Мяготин Артем Владимирович – старший преподаватель кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»

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

Artiom V. Myagotin – Senior Lecturer, Department of Physics and Theoretical Mechanics, Far Eastern State Transport University

Поступила в редакцию/received: 05.09.2024; после рецензирования/reviced: 10.10.2024; принята/accepted 12.10.2024.