УЛК 535.8

С.А. Михнов, Р.В. Литвинов, Е.С. Юрков, Д.А. Конкин, А.С. Задорин

Обращение волнового фронта световой волны при вырожденном четырехволновом взаимодействии в наноколлоидной системе

Рассмотрено обрашающее зеркало с внешней накачкой на основе вырожденного четырехволнового взаимодействия в наноколлоидной системе за счет действия на наночастицы градиентной световой силы. Показана возможность реализации мультистабильных состояний зеркала, соответствующих различной средней интенсивности светового поля. Для случая взаимодействия в водном коллоиде полистирольных частиц на длине волны света 532 нм выполнены расчеты коэффициента отражения световой волны с обращенным волновым фронтом.

Ключевые слова: обращающее зеркало, коэффициент отражения, многозначная функция.

Вырожденное четырехволновое взаимодействие (ВЧВВ) световых волн за счет различных механизмов оптической нелинейности наноколлоидных систем было реализовано в работах [1, 2].

Модель оптической нелинейности коллоидов, связанная с действием на наночастицы градиентной световой силы, использована в работах [3-5]. Для интенсивности света порядка (~) ГВт/м² и ниже диэлектрическая проницаемость таких систем может быть получена в рамках приближения Максвелла-Гарнетта в виде [3]

$$\varepsilon_c = n_b^2 + N_0 V_{eff} \left[1 + \left(V_{eff} \varepsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* / 2k_B T \right) \right], \tag{1}$$

где $V_{eff} = 3V_p n_b^2 \left(n_p^2 - n_b^2\right) / \left(n_p^2 + 2n_b^2\right);$ N, $V_p = \pi d_p^3 / 6$ и d_p – концентрация, объем и диа-

метр наночастиц, соответственно; n_b и n_p – показатели преломления дисперсионной среды и наночастиц, соответственно; ε_0 , k_B и T – фундаментальная диэлектрическая константа, постоянная Больцмана и абсолютная температура, соответственно; Е – вектор электрической напряженности светового поля.

Схема ВЧВВ в наноколлоидной системе представлена на рис. 1. В общем случае произвольной поляризации световых волн, распространяющихся в наноколлоиде, пространственно неоднородная часть возмущений диэлектрической проницаемости общим световым полем представляет собой суперпозицию четырех пространственных решеток [6].

Если волны 1 и 4 имеют одинаковую поляризацию, ортогональную одинаковой поляризации волн 2 и 3, возмущения диэлектрической проницаемости представляет собой



Рис. 1. Симметричное четырехволновое взаимодействие в наноколлоидной системе

единственную пространственную решетку пропускающего типа. При этом зависимость амплитуд световых волн от длины взаимодействия описывается хорошо известной системой уравнений связанных волн [6, 7]. Входящая в эти уравнения постоянная связи у в рассматриваемом случае градиентного механизма оптической нелинейности может быть получена в виде

$$\gamma = \pi \varepsilon_0 N_0 V_{eff}^2 J_0 / 4\lambda n_b k_B T , \qquad (2)$$

где $J_0 = \left|A_1\right|^2 + \left|A_2\right|^2 + \left|A_3\right|^2 + \left|A_4\right|^2$ – средняя световая интенсивность, сохраняющаяся при взаимодействии в непоглощающих свет средах [6, 7]; А_n - скалярные амплитуды световых волн (*n* =1...4); λ – длина волны света. Отметим, в рассматриваемом случае связь между волнами в наноколлоидной системе оказывается пропорциональной величине J_0 .

В случае зеркала с внешней накачкой, используемого для обращения волнового фронта волны 4, волна 3 на границе x = d отсутствует (см. рис. 1). Анализ уравнений связанных волн и их первых интегралов, найденных в работах [6, 7] показывает, что расчет коэффициента отражения зеркала ρ может быть выполнен, если определена интенсивность $J_{1d} = |A_{1d}|^2$ волны 1 на границе x = d, которая удовлетворяет следующему трансцендентному уравнению:

$$\left[\Delta^{2} \left(J_{1d} - J_{10}\right) + 4J_{1d}J_{2d}J_{40}\right] \operatorname{tg}^{2} \left(\frac{\sqrt{\Delta^{2} + 4J_{1d}J_{2d}}}{2J_{0}}\gamma d\right) + \left(J_{1d} - J_{10}\right) \left(\Delta^{2} + 4J_{1d}J_{2d}\right) = 0, \quad (3)$$

где $\Delta = J_{2d} - J_{10} - J_{40}$; $J_{2d} = |A_{2d}|^2$; $J_{10} = |A_{10}|^2$; $J_{40} = |A_{40}|^2$; d – длина взаимодействия в наноколлоидной системе. Можно сказать, что все корни этого уравнения лежат в интервале $J_{10}\Delta^2/(\Delta^2 + 4J_{2d}J_{40}) < J_{1d} < J_{10}$, а их число определяется аргументом тангенса $\vartheta = \gamma d \sqrt{\Delta^2 + 4J_{1d}J_{2d}}/2J_0$. Если малые окрестности точек $\vartheta_s = s\pi/2$, $(s = \pm 1, \pm 2, \pm 3...)$ лежат далеко за пределами этого интервала, то уравнение (3) имеет только один корень $J_{1d,0}$, близкий по величине к величине J_{10} . Если в этот интервал попадает одна из малых окрестностей точек $\vartheta_s = s\pi/2$, то уравнение (3) может иметь три корня. Попадание в этот ин-

тервал еще одной подобной окрестности может увеличить количество корней на два. В случае попадания в этот интервал Nокрестностей точек $\vartheta_s = s\pi/2$ количество корней уравнения (3) может составить число, равное 2N+1. Каждому корню $J_{1d,j}$ (j=0+N) этого уравнения соответствует коэффициент отражения ρ , который, в соответствии с алгоритмом, разработанным в работах [6, 7], может быть получен в виде

$$\rho_{j} = \frac{4J_{1d,j}J_{2d}\tan(\vartheta_{j})^{2}}{4J_{1d,j}J_{2d} + \Delta^{2}\left[1 + \tan(\vartheta_{j})^{2}\right]}.$$
 (4)

Так как постоянная связи пропорциональна средней интенсивности светового поля J_0 , то коэффициент отражения может принимать несколько значений ρ_j при одной и той же интенсивности J_0 . На рис. 2 представлен контурный график многозначной поверхности коэффициента отражения над плоскостью параметров J_0 и d_p . Соответствующий ему график поверхности представлен на рис. 3. Расчеты выполнены при условиях $J_{10} = J_{2d}$ и $J_{40}/(J_{10}+J_{2d})=10^{-4}$ для следующих параметров: $\lambda = 532$ нм, $N_0 = 10^{19}$ м⁻³, $n_p = 1,56$, $n_b = 1,33$, d = 5 мм.

Характерно, что поверхности коэффициентов отражения ρ_1 и ρ_3 в масштабе рис. З практически сливаются с поверхностями ρ_0 и ρ_2 , соответственно. Расстояние по оси интенсивности между поверхностями ρ_0 и ρ_1 , отсчитываемое от точки



Рис. 2. Контурный график коэффициента отражения как многозначной функции средней интенсивности J₀ и диаметра наночастиц d_p



Рис. 3. Однозначные поверхности коэффициента отражения, как функции средней интенсивности J₀ и диаметра наночастиц d_p

 $J_0 = 7,08 \cdot 10^{11}$ B²/м², в которой рождается поверхность ρ_1 , не превышает 5,7 · 10¹⁰ B²/м². Это означает, что переход из одного состояния в другое может быть осуществлен под действием небольших (не более 8%) флуктуаций средней интенсивности J_0 . Поэтому переходы между состояниями ρ_0 и ρ_1 , также как и переходы между состояниями ρ_2 и ρ_3 , связанные с изменением интенсивности J_0 , мало пригодны для использования в бистабильных оптических устройствах. Для этих целей могут быть использованы переходы между $\rho_{0,1}$ и $\rho_{2,3}$.

Таким образом, вырожденное четырехволновое взаимодействие на пропускающей решетке диэлектрической проницаемости, сформированной в наноколлоидной системе за счет действия на наночастицы градиентной силы света, пригодно для реализации обращающего зеркала с внешней накачкой с коэффициентом отражения порядка нескольких тысяч. В случае большой приведенной длины зеркала оно может обладать устойчивыми мультистабильными состояниями, переходы между которыми осуществляются за счет изменения средней интенсивности светового поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-02-99024-р_офи). С.А. Михнов поддержан грантом в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № П580 от 05 августа 2009 г.).

Литература

1. Direct detection of optical phase conjugation in a colloidal medium / C. López-Mariscal, J. Gutiérrez-Vega, D. McGloin, K. Dholakia // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, $N_{\rm P}$ 10. – P. 6330–6335.

2. Нелинейно-оптические свойства гетерогенных жидких нанофазных композитов на основе широкозонных наночастиц Al₂O₃ / Ю.Н. Кульчин, А.В. Щербаков, В.П. Дзюба и др. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, вып. 2. – С. 154–158.

3. Вырожденное взаимодействие двух световых волн на динамической решетке в коллоидных растворах с наночастицами Fe₃O₄ / E.Ю. Агеев, P.B. Литвинов, Н.Д. Хатьков и др. // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, вып. 5. – С. 435–441.

4. Matuszewski M. Spatial solitons and light-induced instabilities in colloidal media / M. Matuszewski, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // Optics express. – 2008. – Vol. 16, \mathbb{N} 2. – P. 1371–1376.

5. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions / R. El-Gauaiuy, D.N. Christodoulides, C. Rotschild, M. Segev // Optics express. – 2007. – Vol. 15, $N_{\rm P}$ 16. – P. 10207–10218.

6. Одулов С.Г. Лазеры на динамических решетках: оптические генераторы на четырехволновом смешении / С.Г. Одулов, М.С. Соскин, А.И. Хижняк. – М.: Наука, – 1990. – 272 с.

7. Theory and Applications of Four-Wave Mixing in Photorefractive Media / M. Croning-Golomb, B. Fisher, J.O. White, A. Yariv // IEEE J. Quantum Electronics. – 1984. – Vol. 20, \mathbb{N} 1. – P. 12–30.

Михнов Сергей Анатольевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: sergej-mikhnov@yandex.ru

Литвинов Рудольф Викторович Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РЗИ ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-38-84 Эл. почта: LitvinovRV@rzi.tusur.ru

Юрков Евгений Сергеевич

Студент каф. РЗИ ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: YurkovES@Gmail.ru Конкин Дмитрий Анатольевич Аспирант каф._РЗИ ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: KonkinDA@rzi.tusur.ru

Задорин Анатолий Семенович

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. РЗИ, декан РТФ ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: Anatoly.Zadorin@rzi.tusur.ru

Mikhnov S.A., Litvinov R.V., Yurkov E.S., Konkin D.A., Zadorin A.S. Phase conjugation of light wave at degenerate four-wave mixing in nano-colloidal system

The phase-conjugate mirror with an external pump, which is based on the degenerate four-wave mixing in a nanosuspension caused by gradient light force action on nanoparticles, is considered. A possibility of implementation of multistable mirror states corresponding to different average intensity of the light field is shown. Calculations of the reflection coefficient of the light wave with conjugate wave front have been carried out for the case of four-wave mixing at wavelength of light 532 nm in an aqueous colloid of polystyrene particles.

Keywords: phase-conjugate mirror, reflection coefficient, multivalued function.