

УДК 535.317.1

## ВСТРЕЧНОЕ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРОЗРАЧНОЙ СУСПЕНЗИИ НАНОЧАСТИЦ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

© 2021 г. А. Д. Ремзов<sup>1</sup>, \*, М. В. Савельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева”, Самара, Россия

\*E-mail: remzov1998@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 27.08.2021 г.

Проведен теоретический анализ пространственного спектра объектной волны при четырехволновом взаимодействии в прозрачной суспензии наночастиц. Показано, что при распространении встречных волн накачки ортогонально силе тяжести, действующей на наночастицы, вблизи нулевой пространственной частоты существует провал в модуле амплитуды объектной волны. Полуширина провала увеличивается с ростом эффективной массы одной наночастицы.

DOI: 10.31857/S0367676521120267

### ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные среды, такие как коллоидные растворы, суспензии наночастиц, активно применяются для реализации различных нелинейно-оптических процессов: от лазерной абляции до динамической голографии [1–11]. В частности, нерезонансный характер термодиффузионной и электрострикционной нелинейностей [11–14] позволяет применять их с использованием широкого диапазона длин волн в четырехволновых преобразователях излучения, которые осуществляют обращение волнового фронта падающей (сигнальной) волны [15]. При этом важно знать не только коэффициент отражения преобразователя (или дифракционную эффективность записываемой голограммы) [7, 14], но и степень соответствия пространственного распределения амплитуды волны с обращенным волновым фронтом (объектной волны) распределению амплитуды сигнальной волны [16].

К настоящему времени проведен анализ вида пространственного спектра объектной волны (ПСОВ) при четырехволновом взаимодействии (ЧВВ) в прозрачных суспензиях наночастиц в зависимости от интенсивности [17], угла падения и расходимости волн накачки [18, 19], соотношения их длин волн [15]. При этом пренебрегалось силой тяжести, действующей на наночастицы.

В коллоидных растворах энергия теплового движения молекул жидкости сравнима с энергией растворенных наночастиц, находящихся в гра-

витационном поле Земли [20–23]. В работе [24] показано, что поток наночастиц, вызванный силой тяжести, может существенно влиять на эффективность преобразования низких пространственных частот сигнальной волны. При этом считалось, что волны накачки распространяются навстречу друг другу в вертикальной плоскости, т.е. коллинеарно силе тяжести.

В настоящей работе в зависимости от массы наночастиц в прозрачной суспензии анализируется вид ПСОВ, образующейся в процессе ЧВВ в схеме с горизонтально распространяющимися волнами накачки.

### МОДЕЛЬ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрено вырожденное ЧВВ в вертикальном плоском слое прозрачной суспензии наночастиц, заключенном между плоскостями  $z = 0$  и  $z = \ell$  [18]. Первая волна накачки и сигнальная волна с комплексными амплитудами  $A_1$  и  $A_3$ , соответственно, падают на переднюю грань, а вторая волна накачки с амплитудой  $A_2$  — на заднюю. В приближениях заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента преобразования в случае, когда волна  $A_2$  некогерентна с волнами  $A_1$  и  $A_3$ , интенсивность излучения  $I$ , распространяющегося в нелинейной среде, может быть представлена в виде суммы интенсивностей волн накачки и слагае-

мых, обусловленных интерференцией волн  $A_1$  и  $A_3$  [24, 25]

$$I = A_1 A_1^* + A_2 A_2^* + A_1 A_3^* + A_1^* A_3, \quad (1)$$

Наличие градиента интенсивности вследствие диффузии, электрострикции и действия поля тяжести Земли приводит к изменению в пространстве концентрации наночастиц  $\delta C$ , растворенных в жидкости [15, 26, 27]. Из-за возникающего потока частиц вследствие эффекта Дюфура изменяется также температура среды  $\delta T$ . Таким образом, в среде записывается фазовая решетка, обусловленная при малых начальных концентрациях наночастиц вкладом в изменение показателя преломления в основном изменении температуры [12, 14, 28, 29]. В результате дифракции второй волны накачки возникает объектная волна с амплитудой  $A_4$ , волновой фронт которой комплексно-сопряжен (обращен) по отношению к фронту сигнальной волны [24].

Вырожденное ЧВВ в прозрачной среде описывается уравнением Гельмгольца вида [16, 19]

$$\left( \nabla^2 + k^2 + \frac{2k^2}{n_l} \frac{dn}{dT} \delta T \right) \sum_{j=1}^4 (A_j + A_j^*) = 0, \quad (2)$$

где  $k = 2\pi n_l / \lambda$ ,  $n_l$  – показатель преломления жидкости в отсутствие излучения,  $\lambda$  – длина волны взаимодействующих волн,  $(dn/dT)$  – термооптический коэффициент.

Уравнение (2) дополняется системой стационарных материальных уравнений диффузии и теплопроводности, учитывающих поле тяжести Земли [24]

$$D_{22} \nabla^2 \delta C = \gamma \nabla^2 I + \frac{D_{22} m}{k_B T_0} (\bar{g}, \nabla \delta C), \quad (3)$$

$$D_{11} \nabla^2 \delta T = -D_{12} \nabla^2 \delta C. \quad (4)$$

Здесь  $D_{11}$  – коэффициент теплопроводности,  $D_{12}$  – коэффициент, характеризующий эффект Дюфура,  $D_{22}$  – коэффициент диффузии,  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий явление электрострикции [25],  $m$  – эффективная масса одной наночастицы в жидкости с поправкой на силу Архимеда,  $\bar{g}$  – ускорение свободного падения,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T_0$  – начальная температура суспензии.

Величина  $\gamma$  пропорциональна поляризуемости наночастиц, которая определяется их показателем преломления, а также показателем преломления жидкости  $n_l$  [26, 28].

Рассматривались плоские волны накачки, распространяющиеся строго вдоль оси  $z$  навстречу друг другу [24]. Их амплитуды на гранях слоя среды равны соответственно  $A_{10}$  и  $A_{20}$ . Система координат выбрана таким образом, чтобы сила тяжести была сонаправлена с осью  $x$ . В соответствии с

выражением (1), описывающим распределение интенсивности излучения в среде, изменения концентрации  $\delta C$  и температуры  $\delta T$  представлялись в виде суммы медленно и быстро меняющихся в зависимости от поперечных координат  $x$  и  $y$  составляющих [25]. Сигнальная и объектная волны раскладывались по плоским волнам  $\tilde{A}_3(\bar{\chi})$  и  $\tilde{A}_4(\bar{\chi})$ , а быстро меняющиеся составляющие  $\delta C$  и  $\delta T$  – по гармоническим решеткам  $\delta \tilde{C}(\bar{\chi})$  и  $\delta \tilde{T}(\bar{\chi})$  (где  $\bar{\chi}$  – пространственная частота, проекция волнового вектора объектной волны на плоскость  $xy$ ) [19].

При условии равенства нулю амплитуды объектной волны на задней грани нелинейного слоя выражение, описывающее в параксиальном приближении ( $|\bar{\chi}| \ll k$ ) связь ПСОВ на передней грани  $\tilde{A}_{40}(\bar{\chi}) = \tilde{A}_4(\bar{\chi}, z=0)$  со спектром температурной решетки  $\delta \tilde{T}$  имеет вид [24, 25]

$$\tilde{A}_{40}(\bar{\chi}) = -i \frac{k}{n_l} \frac{dn}{dT} A_{20} \exp(-iP) \int_0^{\ell} \delta \tilde{T}(\bar{\chi}, z) \times \exp\left(i \frac{\bar{\chi}^2}{2k} z\right) dz, \quad (5)$$

где  $P$  – фазовый набег, связанный с распространением в среде волн накачки.

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СПЕКТР ОБЪЕКТНОЙ ВОЛНЫ

Для получения явного вида  $\tilde{A}_{40}(\bar{\chi})$  необходимо было найти выражения вначале для пространственного спектра концентрационной, а затем и температурной решеток. При этом материальные уравнения (3) и (4) с учетом сделанных выше приближений переписывались в виде

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \bar{\chi}^2 + i \frac{m}{k_B T_0} (\bar{g}, \bar{\chi}) \right] \delta \tilde{C}(\bar{\chi}, z) = -\bar{\chi}^2 \frac{\gamma A_{10} \tilde{A}_{30}^*(\bar{\chi})}{D_{22}} \left( \frac{\bar{\chi}^2}{4k^2} + 1 \right) \exp\left(-i \frac{\bar{\chi}^2}{2k} z\right), \quad (6)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \bar{\chi}^2 \right) \delta \tilde{T}(\bar{\chi}, z) = -\frac{D_{12}}{D_{11}} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \bar{\chi}^2 \right) \delta \tilde{C}(\bar{\chi}, z). \quad (7)$$

Здесь  $\tilde{A}_{30}(\bar{\chi}) = \tilde{A}_3(\bar{\chi}, z=0)$  – пространственный спектр сигнальной волны на передней грани нелинейного слоя [18].

Система уравнений (6), (7) дополняется граничными условиями отсутствия полного потока

наночастиц через грани слоя и неизменности на границах температуры [19, 25, 30, 31]

$$\left. \frac{\partial \delta \tilde{C}(\bar{x}, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial \delta \tilde{C}(\bar{x}, z)}{\partial z} \right|_{z=\ell} = 0, \quad (8)$$

$$\delta \tilde{T}(\bar{x}, z = 0) = \delta \tilde{T}(\bar{x}, z = \ell) = 0. \quad (9)$$

С учетом условий (8) и (9) пространственный спектр решетки  $\delta \tilde{T}$  можно записать следующим образом [24]

$$\delta \tilde{T}(\bar{x}, z) = \sum_{j=1}^5 G_j(\bar{x}) \exp[\lambda_j(\bar{x})z], \quad (10)$$

где  $\lambda_{1,2}(\bar{x}) = \pm \sqrt{\bar{\chi}^2 - i \frac{m}{k_B T_0} (\bar{g}, \bar{x})}$ ,  $\lambda_3(\bar{x}) = -i \frac{\bar{\chi}^2}{2k}$ ,  
 $\lambda_{4,5}(\bar{x}) = \pm |\bar{\chi}|$ ,

$$G_{1,2}(\bar{x}) = \pm \frac{1}{2} \operatorname{csch}[\lambda_1(\bar{x})\ell] G_3(\bar{x}) \frac{\lambda_3(\bar{x})}{\lambda_{1,2}(\bar{x})} \times$$

$$\times \{ \exp[\lambda_{2,1}(\bar{x})\ell] - \exp[\lambda_3(\bar{x})\ell] \},$$

$$G_3(\bar{x}) = - \frac{\gamma D_{12} A_{40} \tilde{A}_{30}^*(\bar{x}) [\bar{\chi}^2 - \lambda_3^2(\bar{x})]}{D_{11} D_{22} [\lambda_1^2(\bar{x}) - \lambda_3^2(\bar{x})]},$$

$$G_{4,5}(\bar{x}) = \pm \frac{1}{2} \operatorname{csch}[\lambda_4(\bar{x})\ell] \sum_{j=1}^3 G_j(\bar{x}) \times$$

$$\times \{ \exp[\lambda_{5,4}(\bar{x})\ell] - \exp[\lambda_j(\bar{x})\ell] \}.$$

В результате подстановки выражения (10) в (5) получена аналитическая связь пространственных спектров сигнальной и объектной волн на передней грани нелинейного слоя прозрачной суспензии наночастиц при вырожденном встречном ЧВВ

$$\tilde{A}_{40}(\bar{x}) = -i \frac{k}{n_l} \frac{dn}{dT} A_{20} \exp(-iP) \sum_{j=1}^5 G_j(\bar{x}) \times$$

$$\times \frac{\exp[\lambda_j(\bar{x})\ell - \lambda_3(\bar{x})\ell] - 1}{\lambda_j(\bar{x}) - \lambda_3(\bar{x})}. \quad (11)$$

Выражение (11) по форме записи схоже с выражением для ПСОВ, представленным в работе [24], однако записано для схемы ЧВВ с горизонтально распространяющимися волнами накачки. В случае пренебрежимо малой эффективной массы одной наночастицы  $m$  оно совпадает с ПСОВ, полученным без учета поля тяжести Земли, действующего на наночастицы [17, 18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

В качестве прозрачной двухкомпонентной среды рассмотрена водная ( $n_l = 1.333$ ) суспензия наночастиц при начальной температуре  $T_0 = 300$  К. Длина волны взаимодействующих волн  $\lambda = 532$  нм. Считалось, что сигнальная волна распространя-

ется от точечного источника, расположенного на передней грани среды ( $\tilde{A}_{30}(\bar{x}) = \text{const}$ ) [17, 18].

На рис. 1 приведены модули ПСОВ на передней грани слоя нелинейной среды толщиной  $\ell = 1$  мм. В случае, когда эффективная масса одной наночастицы мала (рис. 1а), в модуле ПСОВ на низких пространственных частотах наблюдается провал, имеющий аксиальную симметрию, т.е.  $|\tilde{A}_{40}|$  зависит только от модуля пространственной частоты  $\bar{\chi} = \{\chi_x, \chi_y\}$  (где  $\chi_x, \chi_y$  – проекции вектора  $\bar{\chi}$  на оси  $x$  и  $y$ , соответственно). Вид модуля ПСОВ является типичным для прозрачных суспензий наночастиц [17, 19]. С увеличением пространственной частоты величина  $|\tilde{A}_{40}|$  монотонно возрастает, а затем выходит на постоянное значение

$$A_{max} = \left| \frac{k\ell\gamma D_{12} A_{40} A_{20} \tilde{A}_{30}^*}{n_l D_{11} D_{22}} \frac{dn}{dT} \right|. \quad (12)$$

Выражение (12) совпадает с представленным в работе [17] для случая, когда поле тяжести, действующее на наночастицы в жидкости, не учитывалось.

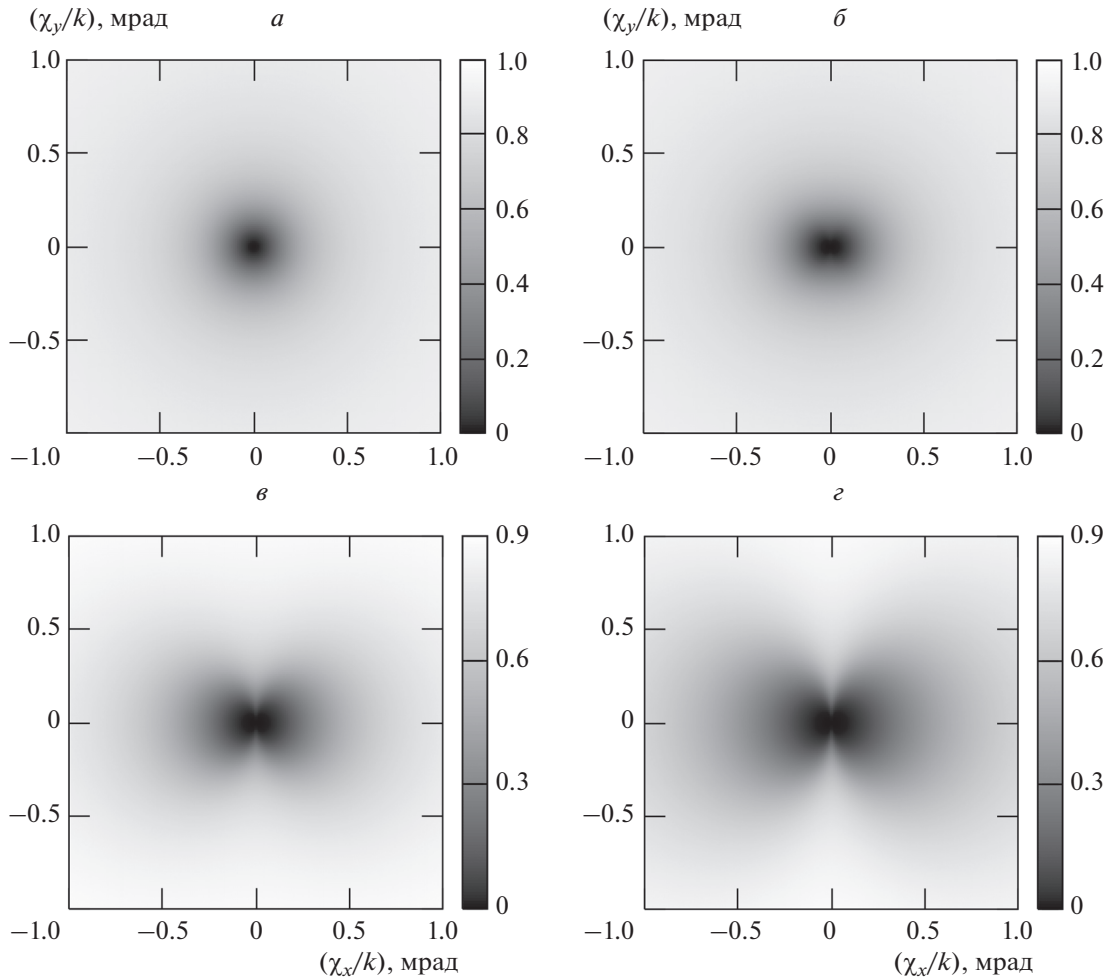
В отличие от схемы с вертикально распространяющимися волнами накачки [24] при учете поля тяжести Земли не наблюдается возникновения максимума в модуле ПСОВ вблизи нулевой частоты. Если проекция  $\chi_y = 0$ , то с увеличением массы одной наночастицы происходит уширение провала вдоль оси  $\chi_x$  (рис. 1б), а при некотором отклонении  $\chi_y$  от нуля – его раздваивание (рис. 1в, 1г). При этом в направлении оси  $\chi_y$  при  $\chi_x = 0$  изменений в структуре и ширине провала не наблюдается. Такое нарушение аксиальной симметрии связано с отмеченной выше коллинеарностью вектора  $\bar{g}$  оси  $x$ .

Численный анализ выражения (11) показывает, что при смене знака проекции  $g_x$  изменения вида модуля  $\tilde{A}_{40}$  не происходит.

Рассмотрим теперь фазу ПСОВ при  $\chi_y = 0$  (рис. 2). На пространственной частоте  $\chi_x \rightarrow 0$  происходит скачок фазы на  $\pi$ . При малых значениях эффективной массы одной наночастицы характер изменения фазы в зависимости от  $\chi_x$  близок к гиперболическому. С ростом  $m$  в представленном диапазоне  $\chi_x$  эта зависимость стремится к линейному закону. В целом же зависимость фазы ( $\varphi$ ) в ветвях кривых рис. 2 от проекции пространственной частоты и массы одной наночастицы описывается выражением

$$\varphi(\chi_x, m) = \frac{\pi}{2} \operatorname{sign}(\chi_x) - \arctg\left(\frac{k_B T_0 \chi_x}{mg_x}\right). \quad (13)$$

Для анализа влияния поля тяжести Земли на пространственную структуру объектной волны



**Рис. 1.** Модули ПСОВ  $|\tilde{A}_{40}|/A_{max}$  без учета поля тяжести (а) и с учетом поля тяжести при  $m = 1$  (б), 3 (в), 5 фг (г). Толщина слоя водной суспензии  $\ell = 1$  мм.

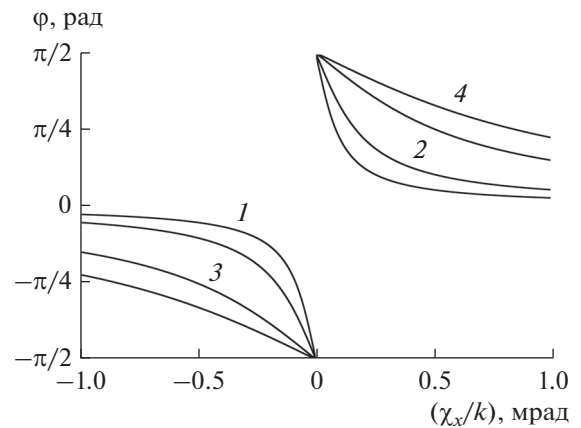
введена полуширина провала  $\Delta\chi$  [24] в модуле ПСОВ, которая определялась из решения уравнения вида [17]

$$|\tilde{A}_{40}(\chi_x = \Delta\chi, \chi_y = 0)| = \frac{1}{2} A_{max}. \quad (14)$$

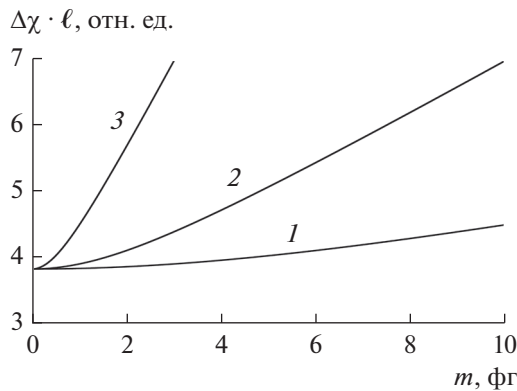
На рис. 3 приведены зависимости полуширины провала от эффективной массы одной наночастицы при различных толщинах слоя водной суспензии. С увеличением  $m$  величина  $\Delta\chi$  монотонно возрастает с последующим выходом на зависимость, близкую к линейной

$$\frac{\Delta\chi}{k} = \alpha m + \beta. \quad (15)$$

В выражении (15) коэффициент  $\alpha$  в представленном диапазоне  $\ell$  от 0.1 до 1 мм не зависит от толщины слоя и равен  $8.68 \cdot 10^{-5}$  фг $^{-1}$ , а коэффициент  $\beta$  определяется величиной полуширины провала в случае, когда эффективная масса нано-



**Рис. 2.** Фаза ПСОВ  $\tilde{A}_{40}$  при  $\chi_x = 0$ ,  $m = 0.5$  (1), 1 (2), 3 (3), 5 фг (4). Толщина слоя водной суспензии  $\ell = 1$  мм.



**Рис. 3.** Зависимость полуширины провала в модуле ПСОВ  $\tilde{A}_{40}$  от эффективной массы одной наночастицы в водной суспензии при  $\chi_x = 0$ ,  $\ell = 0.1$  (1), 0.3 (2), 1 мм (3).

частицы пренебрежимо мала, и с ростом толщины слоя уменьшается по закону  $\ell^{-1}$ . В частности, при  $\ell = 0.1, 0.3$  и 1 мм, значения  $\beta$  равны соответственно 1.8, 0.58 и 0.18 мрад.

Обратно пропорциональная зависимость коэффициента  $\beta$  от толщины среды подтверждается аналогичной зависимостью, полученной без учета поля тяжести Земли, действующего на наночастицы в прозрачной жидкости [17]. Следует отметить, что в работе [24], в которой поле тяжести учитывалось, также получена линейная зависимость вида (15) полуширины провала от эффективной массы одной наночастицы для больших значений  $m$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено аналитическое выражение, связывающее ПСОВ с пространственным спектром сигнальной волны на передней грани слоя прозрачной суспензии наночастиц в процессе вырожденного ЧВВ в схеме, в которой встречные волны накачки распространяются ортогонально направлению поля тяжести Земли. Показано, что в противоположность схеме с волнами накачки, распространяющимися в вертикальной плоскости [24], при учете поля тяжести в схеме с горизонтально распространяющимися волнами накачки не наблюдается возникновения максимума модуля амплитуды объектной волны в области низких пространственных частот.

Рост эффективной массы одной наночастицы приводит к увеличению полуширины провала, возникающего в модуле ПСОВ в направлении, коллинеарном направлению поля тяжести. Это увеличение сопровождается монотонным выходом на зависимость, близкую к линейной. При

этом, как и в случае вертикального распространения волн накачки [24], коэффициент пропорциональности не меняется с увеличением толщины среды.

Установлено, что характер изменения фазы ПСОВ вдоль направления поля тяжести описывается функцией арктангенса от отношения  $k_B T_0 \chi_x / m g_x$ , где в числителе находится пространственная частота объектной волны, а в знаменателе — величина, характеризующая проекцию силы тяжести, действующей на наночастицы. При этом на нулевой пространственной частоте фаза испытывает скачок на  $\pi$ .

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании систем нелинейной адаптивной оптики на основе прозрачных суспензий наночастиц для задач коррекции мелкомасштабных фазовых искажений сигнальной волны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boltaev G.S., Ganeev R.A., Krishnendu P.S. et al.* // *Appl. Phys. A*. 2018. V. 124. Art. No. 766.
2. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 12. С. 1581; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 12. P. 1396.
3. *Krishnakanth K.N., Bharathi M.S.S., Hamad S., Venugopal R.S.* // *AIP Conf. Proc.* 2018. V. 1942. Art. No. 050122.
4. *Nallusamy N., Zu P., Raja R.V.J. et al.* // *Appl. Opt.* 2019. V. 58. No. 2. P. 333.
5. *Luers A., Salhlberg A.-L., Hochgreb S., Ewart P.* // *Appl. Phys. B*. 2018. V. 124. Art. No. 43.
6. *Salman A.M., Salman A.A., Al-Janabi A.* // *Appl. Opt.* 2019. V. 58. No. 22. P. 6136.
7. *Mjagotin A.V., Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Ivanov V.I.* // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. Art. No. 1120861.
8. *Ko B., Lu W., Sokolov A.V., Lee H.W.H. et al.* // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. Art. No. 15753.
9. *Ivanov V.I., Ivanova G.D.* // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. Art. No. 108331S.
10. *Qiu W., Bruus H., Augustsson P.* // *Phys. Rev. E*. 2020. V. 102. Art. No. 013108.
11. *Xiang D., Wu J., Rottler J., Gordon R.* // *Nano Lett.* 2016. V. 16. P. 3638.
12. *Giannakopoulou N., Williams J.B., Moody P.R. et al.* // *Nanoscale*. 2020. V. 12. P. 4622.
13. *Samim M., Krouglov S., James D.F., Barzda V.* // *J. Opt. Soc. Amer. B*. 2016. V. 33. No. 12. P. 2617.
14. *Афанасьев А.А., Гайда Л.С., Курочкин Ю.А. и др.* // *Квант. электрон.* 2016. Т. 46. № 10. С. 891; *Afanas'ev A.A., Gaida L.S., Kurochkin Yu.A. et al.* // *Quant. Electron.* 2016. V. 46. No. 10. P. 891.
15. *Воробьева Е.В., Ивахник В.В., Савельев М.В.* // *Изв. вузов. физ.* 2015. Т. 58. № 11/3. С. 162.
16. *Ивахник В.В.* Обращение волнового фронта при чetyрехволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010.

17. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Комп. оптика. 2015. Т. 39. № 2. С. 197.
18. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Комп. оптика. 2016. Т. 40. № 1. С. 19.
19. Ivakhnik V.V., Savelyev M.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 737. Art. No. 012007.
20. Волюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975.
21. Черепанов И.Н. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 12. С. 1763; Черепанов И.Н. // Tech. Phys. 2018. V. 63. No. 12. P. 1703.
22. Croccolo F., Garcia-Fernandez L., Bataller H. et al. // Phys. Rev. E. 2019. V. 99. Art. No. 012602.
23. Khe V.K., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. Art. No. 104664K.
24. Савельев М.В., Ивахник В.В. // Изв. вузов. Радиофиз. 2020. Т. 63. № 8. С. 694; Savelyev M.V., Ivakhnik V.V. // Radiophys. Quant. Electron. 2021. V. 63. No. 8. P. 625.
25. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Физ. волн. проц. и радиотехн. сист. 2018. Т. 21. № 2. С. 5.
26. Ливашвили А.И., Костина Г.В., Якунина М.И. // Опт. журн. 2013. Т. 80. № 2. С. 71; Livashvili A.I., Kostina G.V., Yakunina M.I. // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. No. 2. P. 124.
27. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Myagotin A.V. // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. Art. No. 110240Y.
28. Tabiryani N.V., Luo W. // Phys. Rev. E. 1998. V. 57. No. 4. P. 4431.
29. Gerakis A., Yeh Y.-W., Shneider M.N. et al. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9. Art. No. 014031.
30. Wang H.-C., Yu X.-Y., Chueh Y.L. et al. // Opt. Expr. 2011. V. 19. No. 20. P. 18893.
31. Larsson C., Kumar S. // Phys. Rev. Fluids. 2021. V. 6. Art. No. 034004.

## Counter four-wave mixing in transparent suspension of nanoparticle in the Earth's gravity field

A. D. Remzov<sup>a, \*</sup>, M. V. Savelyev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Samara National Research University, Samara, 443011 Russia

\*e-mail: remzov1998@mail.ru

Spatial spectrum of the object wave at the four-wave mixing in a transparent nanoparticle suspension is theoretically analyzed. When the counterpropagating pump waves propagate orthogonal to the gravity force acting on the nanoparticles, it is shown that near the zero spatial frequency there is a dip in the modulus of the object wave amplitude. The half-width of the dip increases with an increase in the effective mass of one nanoparticle.