

Обращение волнового фронта в суспензии с учетом распределения наночастиц по размерам

К.Е. Алеферкина, М.В. Савельев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Обоснование. Вырожденное четырехволновое взаимодействие (ВЧВВ) может быть эффективно реализовано во множестве нелинейных сред. Например, в коллоидных растворах и суспензиях наночастиц нелинейность показателя преломления обусловлена вкладами изменений температуры и концентрации компонент. При решении прикладных задач зачастую возникает вопрос о точности соответствия между пространственными распределениями амплитуд сигнальной и объектной волн (или волны с обращенным волновым фронтом). За последние пять лет при встречном ВЧВВ в суспензии исследовано влияние на пространственный спектр объектной волны (ПСОВ) поглощения жидкости, массы наночастиц, их дисперсии в нормальном распределении по размерам [1–3]. В монографии [4] отмечено, что для наночастиц радиусом более 10 нм характерно логарифмически нормальное распределение по размерам в связи с особенностями их формирования.

Цель — анализ ПСОВ при логарифмически нормальном распределении наночастиц в суспензии по размерам с учетом вклада в их поток поля тяжести.

Методы. Для получения выражения, описывающего ПСОВ, в работе использовался ряд приближений: заданного поля по плоским волнам накачки, малого коэффициента преобразования, медленно меняющихся амплитуд, а также некогерентность волн накачки и параксиальность распространения волн [1–3, 5]. Такие факторы, как интерференция сигнальной волны и волны накачки, диффузия наночастиц в жидкости, электрострикция в мощном поле лазерного излучения, земная гравитация, являются причинами наведения в суспензии решетки концентрации. Если начальная концентрация частиц невелика, то возникновение объектной волны при ВЧВВ связано лишь с изменением температуры среды вследствие поглощения излучения и эффекта Дюфура [2].

Далее изменения концентрации и температуры представляются в виде сумм быстро и медленно меняющихся в зависимости от поперечных координат составляющих [1–3, 5]. Осуществляется переход от амплитуд сигнальной и объектной волн, а также быстро меняющихся составляющих концентрации и температуры к их фурье-спектрам.

Считалось, что поток наночастиц через грани среды отсутствует [1, 3, 5]. При этом наряду с диффузионным потоком и потоком поля тяжести в работе учтен электрострикционный поток. Граничным же условием на пространственный спектр температурной решетки является постоянство температуры на гранях.

Результаты. Получены выражения для ПСОВ при ВЧВВ в поглощающей суспензии для двух типов распределения частиц по размерам (логарифмически нормального и нормального). Следует отметить их применимость к схемам встречного ВЧВВ, в которых волны накачки могут распространяться как коллинеарно [1, 6], так и ортогонально [7, 8] полю тяжести Земли.

Анализ ПСОВ проведен для случая ВЧВВ (Nd:YAG-лазер, вторая гармоника) в водной суспензии полистирола толщиной 1 мм. Сигнальная волна моделировалась точечным источником, расположенным на грани слоя среды. Считалось, что электрострикционный вклад в объектную волну существенно превосходит тепловой. В диапазоне малых средних радиусов частиц, который исследовался в статьях [1, 3], рассчитаны модули ПСОВ для двух типов распределения по размерам. В этом диапазоне радиусов пространственная структура объектной волны характеризуется полушириной провала Δx в модуле ПСОВ.

Выводы. Показано, что при фиксированном значении среднеквадратичного отклонения σ в распределении наночастиц по размерам значение Δx в модуле ПСОВ при логарифмически нормальном распределении больше, чем при нормальном распределении. В зависимости от среднего радиуса частиц и величины σ полуширина Δx увеличивается. При этом характер роста Δx от σ зависит от схемы распространения волн накачки при ВЧВВ (коллинеарно или ортогонально полю тяжести Земли).

Ключевые слова: обращение волнового фронта; четырехволновое взаимодействие; суспензия наночастиц; распределение частиц по размерам.

Список литературы

1. Savelyev M.V., Ivakhnik V.V. Spatial selectivity of the four-wave radiation converter with allowance for gravity acting on nanoparticles dissolved in a transparent liquid // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. Vol. 63, No. 8. P. 625–633. DOI: 10.100/s11141-021-10085-9
2. Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения в поглощающей двухкомпонентной среде при больших коэффициентах отражения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 1. С. 5–13.
3. Ивахник В.В., Савельев М.В. Влияние дисперсности наночастиц в прозрачной жидкости на пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 1. С. 9–17. DOI: 10.18469/1810-3189.2023.26.1.9-17
4. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 365 с.
5. Савельев М.В., Ремзов А.Д. Пространственно-временные характеристики четырехволнового преобразователя излучения с учетом поля тяжести Земли, действующего на растворенные в прозрачной жидкости наночастицы // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 4. С. 547–554. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1109
6. Palomba S., Zhang S., Park Y., et al. Optical negative refraction by four-wave mixing in thin metallic nanostructures // Nature Materials. 2012. Vol. 11. P. 34–38. DOI: 10.1038/NMAT3148
7. Bencivenga F., Cucini R., Capotondi F., et al. Four-wave mixing experiments with extreme ultraviolet transient gratings // Nature. 2015. Vol. 520. P. 205–208. DOI: 10.1038/nature14341
8. Larsson C., Kumar S. Nonuniformities in miscible two-layer two-component thin liquid films // Physical Review Fluids. 2021. Vol. 6. ID 034004. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.034004

Сведения об авторах:

Ксения Евгеньевна Алеферкина — студентка, группа 4301-030302D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: aleferkinaksenia@gmail.com

Максим Валерьевич Савельев — научный руководитель, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и спектроскопии; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: belchonokenot@mail.ru