

NUMERICAL MODELING OF OPTICAL LIMITING BY SUSPENSIONS OF CARBON NANOPARTICLES

Belousova I.M., Mironova N.G.^{*}, Yur'ev M.S.

Institute for Laser Physics, 12 Birzhevaya line, 199034 st.Petersburg, Russia

For eyes and optical devices protection from intensive laser radiation there is a need to nonlinear optical limiters design. Nonlinear optical limiter is a device which transmission decreases with input energy density or intensity increasing. At the same time weak signal transmission must be sufficiently high.

In recent years the suspensions of carbon particles have attracted much interest in the context of the problem of nonlinear limiting of laser radiation (see, f.e. [1]). Since carbon particles absorb light in a wide spectral range, suspensions of carbon particles are regarded as a promising candidate for creating a wide band absorbers with color-comfortable vision through it.

The mechanism of nonlinear optical limiting by nanometric size carbon suspensions was supposed in [1] and was refined in our work [2]. Carbon particle absorbs laser radiation which leads to its heating and to heating of surrounding liquid. A high liquid-heating rate leads to a situation where the liquid surrounding the particle is in a deeply metastable state [3] up to a temperature of explosive boiling [4]. The explosive boiling of the liquid volumes in deeply metastable states is initiated. The pressure in the formed vapour shell is equal to the saturation vapour pressure corresponding to the temperature of explosive boiling. This pressure is much higher than the external (atmospheric) pressure and the vapour shell begins to expand. The light scattering by expanding vapour shell leads to nonlinear optical limiting.

In this work we present a self-consistent analysis of the processes of boiling and vapour shell expansion, light absorption and scattering, and light propagation in an extended medium. We consider moderate input energy densities, which not sufficient for heating of carbon particle to the temperature of carbon sublimation (3770 K). The aqueous suspensions of carbon particles are studied. Three tasks were self-consistently solved for nonlinear optical limiting modeling:

-the task of heating and gas-dynamics of forming and growth of vapour shell at the heated particle

-the task of light scattering by formed vapour bubble

- the task of radiation propagation through the perturbed medium and radiation optical limiting.

The temperature radial distribution was calculated by solving the system of heat transfer equations for particle, water and vapour with moving vapour-water boundary. Plesset-Zwick equation, describing the vapour shell growth due to pressure difference, and Herz-Knudsen equation to calculate condensation-evaporation rate were solved [5]. The dependencies of particle, water and vapour thermophysical properties on temperature were taken into account.

The radiation absorption & scattering by carbon particle with vapour shell was calculate in frame of Mie theory for homogeneous sphere. [6]. Concentric sphere carbon particle – vapour shell was considered as homogeneous sphere with single refractive index, calculated by Bruggemann formula [6].

In order to determine the optical limiting, we solved the problem of radiation transmission through an extended medium. The medium was replaced by a set of amplitude screens, for each of which the following parameters were calculated: the radius and density of vapour bubbles formed around particles, scattering and absorption by these two-layer systems, the absorption coefficient as a function of the longitudinal (along the direction of light propagation) coordinate, and the output intensity. It is assumed that the light scattering and absorption at each particle in a given screen occurs independently, which can be justified by a sufficiently low concentration of particles and their random distribution.

The numerical modeling of experiment is performed. The qualitative agreement with experiment is achieved.

The absorption and scattering cross-sections of the two-component system formed, leads us to the conclusion about the predominant role of scattering compared to absorption.

The dependence of photo-induced scattering efficiency on laser radiation parameters – wave length, input energy density, pulse duration is theoretically investigated. We showed that PS in aqueous suspension of nanometric carbon

* Fax: 7(812) 328-58-91 E-mail: nagoga@newmail.ru

particles exists in wide spectral range 400 nm – 1060 nm (for pulse durations of about 10 ns). The numerical simulation showed the PS efficiency reduces with pulse duration shortening.

The calculation was performed for aqueous suspensions. Obviously, that using of liquids with smaller values of heat of vaporization, surface tension, temperature of explosive boiling would allow to achieve more high operating speed. The spectral range of limiting is defined by the properties of surrounding liquid, too.

References

1. Riefl D., Fougeanet F. Investigation of limiting mechanisms in carbon-black suspensions. *Nonlinear Optics* 1999; 21 : 435-446.
2. Belousova I.M., Mironova N.G., Yur'ev M.S. theoretical Investigation of nonlinear limiting of laser radiation power by suspensions of carbon particles. *Optics and Spectroscopy* 2003; 94(1): 86-91
3. Skripov V.P. *Metastabilnaya zhidkost*. Moskva:Nauka, 1972 (in Russian)
4. Pustovalov V.K., Horunjyi I.A., Bobuthenko D.C.. *Obrazovanie i dinamika parovoi obolochki voznikaushei pri vzaimideistvii izluchenia s chastizei v zhidkosti*. *Izv. AN SSSR*; 1988; 52 (9): 1847-1851(in Russian)
5. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznyh sred*. Moskva:Nauka, 1987 (in Russian)
6. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and scattering of light by small particles* . New York, 1983.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ СУСПЕНЗИЕЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Белоусова И.М., Миронова Н.Г.*, Юрьев М.С

Россия, Санкт-Петербург, 199034, Биржевая линия 12, Институт Лазерной Физики

Для защиты глаз и оптических приборов от интенсивного лазерного излучения необходимо создание нелинейных оптических ограничителей - устройств, пропускание которых уменьшается с увеличением интенсивности падающего излучения, при этом пропускание слабого (безопасного) сигнала должно быть достаточно высоким.

В последнее время возрос интерес к созданию оптических ограничителей на суспензиях углеродных наночастиц (см. например [1]). Причина состоит в том, что углеродные частицы поглощают свет в широком спектральном диапазоне и на их базе могут быть созданы широкополосные ограничители лазерной энергии, не имеющие окрашенности.

В [1] предложен механизм нелинейного оптического ограничения в суспензиях углеродных частиц нанометрического размера. Этот механизм уточнен нами в [2]. Углеродная частица поглощает интенсивное лазерное излучение, что приводит к ее нагреву и нагреву окружающей жидкости. Высокая скорость нагрева приводит к тому, что окружающая частицу жидкость глубоко заходит в метастабильное состояние [3] вплоть до температуры взрывного кипения [4]. Происходит взрывное испарение тех объемов жидкости, которые глубоко зашли в метастабильное состояние. Давление в образовавшейся паровой оболочке равно давлению насыщенного пара, которое соответствует температуре взрывного вскипания. Это давление намного превышает внешнее, атмосферное давление, и паровая оболочка начинает расширяться. Рассеяние света на расширяющейся паровой оболочке приводит к нелинейному ограничению излучения.

В данной работе самосогласованно рассматриваются процессы вскипания и расширения паровой оболочки, поглощения и рассеяния света, распространения его в протяженной среде. Рассмотрение проводится при умеренных плотностях входной энергии, недостаточных для нагрева частицы до

температуры сублимации углерода (3770 К). Рассматриваются водные суспензии углеродных частиц. Для численного моделирования нелинейного оптического ограничения света суспензией углеродных частиц были самосогласованно решены три задачи:

-тепловая задача и задача газодинамики образования и роста паровой оболочки на нагретой частице;

-задача рассеяния на образовавшемся паровом пузырьке, окружающем частицу;

-задача прохождения излучения через среду;

Определение радиального распределения температуры в системе углеродная частица-паровая оболочка находится из решения системы уравнений теплопроводности для частицы, паровой оболочки и воды с движущимися граничными условиями. Скорость роста паровой оболочки, вызванная перепадом давлений, определялась из решения уравнения Плессета-Цвика [5], скорость испарения-конденсации рассчитывалась из уравнения Герца-Кнудсена [5]. Учитывались зависимости теплофизических свойств частицы, пара и воды от температуры.

Рассеяние и поглощение системой углеродная частица-паровая оболочка рассчитывалось в соответствии с теорией Ми для однородного шара [6]. Концентрическая сфера углеродная частица-паровая оболочка заменялась однородным шаром с единым эффективным показателем преломления, рассчитанным по формуле Браггемана [6].

Для определения оптического ограничения решалась задача прохождения излучения через протяженную среду. Среда заменялась набором амплитудных экранов, на каждом из которых рассчитывались радиус и плотность паровых оболочек, образовавшихся вокруг частиц, рассеяние и поглощение на этих двухслойных комплексах, вычислялся коэффициент поглощения как функция продольной (вдоль направления распространения света) координаты и выходная интенсивность. Считается, что рассеяние и поглощение на каждой частице на данном

экране происходит независимо, что может быть оправдано достаточно низкой концентрацией частиц и их случайным распределением.

Проведенное численное моделирование показало качественное согласие с результатами эксперимента.

Расчет сечений рассеяния и поглощения образовавшейся двухкомпонентной системы приводит к заключению об основной роли рассеяния по сравнению с поглощением.

Проведено исследование эффективности светоиндуцированного рассеяния от параметров падающего излучения – плотности падающей энергии, длины волны, длительности импульса. Показано, что водная суспензия углеродных частиц эффективно ограничивает лазерное излучение в широком спектральном диапазоне 400 нм – 1064 нм (при длительности импульса 10 нс). С уменьшением длительности импульса эффективность рассеяния падает.

Весь расчет был проведен для водных суспензий. Очевидно, что использование жидкостей с меньшей теплотой парообразования, поверхностным натяжением, температурой взрывного вскипания позволит добиться лучшего быстрогодействия. Спектральный диапазон работы такого ограничителя также определяется свойствами окружающей жидкости.

References

1. Riefl D., Fougeanet F. Investigation of limiting mechanisms in carbon-black suspensions. *Nonlinear Optics* 1999; 21 : 435-446.
2. Белоусова И.М., Миронова Н.Г., Юрьев М.С. Теоретическое исследование нелинейного ограничения лазерной мощности углеродными суспензиями. *Оптика и спектроскопия* 2003;94(1):93-98
3. Скрипов В.П. *Метастабильная жидкость*. Москва:Наука, 1972
4. Пустовалов В.К., Хорунжий И.А., Бобученко Д.С. Образование и динамика паровой оболочки, возникающей при взаимодействии излучения с частицей в жидкости. *Изв. АН СССР, Сер. Физ.* 1988; 52 (9): 1847-1851
5. Нигматуллин Р.И. *Динамика многофазных сред*. Москва:Наука, 1987
6. Борен К., Хафман Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. Москва: Мир, 1986

* Fax: 7(812) 328-58-91 E-mail: nagoga@newmail.ru