

## Физическая аппаратура

УДК 535.211

### Оптико-акустический пинцет со сфокусированным лазерным пучком

Т.В. Малинский, В.Ю. Хомич

*Рассмотрены возможности оптико-акустического пинцета со сфокусированным лазерным пучком для управления положением взвешенных в жидкости микрочастиц. Проведена оценка усредненной силы радиационного давления, действующей на малую сферическую частицу. Показано, что изменением параметров лазерного излучения, возбуждающего акустическое поле, можно менять не только амплитуду усредненной силы, но и ее направление, делая возможным перемещение и удержание микрочастиц на определенном расстоянии от оси пучка в плоскости перетяжки лазерного излучения.*

PACS: 43.35.Ud, 43.25.Qr

*Ключевые слова:* соптоакустика, лазеры, акустические поля, микроманипуляторы, потенциальная яма, микрочастицы.

#### Введение

Задачи управления перемещением взвешенных в жидкости микрочастиц, в частности, клеток, являются актуальными в биологии, приборостроении, медицине и ряде других областей науки и техники. Для их решения наиболее часто используют оптические микроманипуляторы (пинцеты), которые имеют целый ряд ограничений [1, 2]. Небольшие амплитуды создаваемых оптическими пинцетами сил затрудняют управление положением объектов размером более 10 мкм, а необходимость сильной фокусировки лазерного излучения внутри перемещаемого объекта может вызвать перегрев и разрушение последнего. В оптико-акустических (ОА) пинцетах лазерное излучение воздействует не непосредственно на объект, а на прилегающую к нему область, благодаря чему появляется возможность перемещать поглощающие объекты без опасности перегрева последних.

Исследование ОА-пинцетов с гармонически модулированным лазерным излучением, проведенное в работе [3], показало принципиальную возможность ОА-пинцета перемещать в том числе крупные взвешенные микрочастицы диаметром порядка 10 мкм. В работе [4]

были разработаны основы теории ОА-пинцетов с импульсными лазерами и проведены эксперименты, в которых под действием импульсов лазерного излучения перемещались микрочастицы полистироловые сферы и раковые клетки K562. Однако рассматривались цилиндрическая и кольцевая геометрии лазерного пучка, позволяющие перемещать более плотные по сравнению с водой частицы только по одной координате.

Целью данной работы было проведение исследований ОА-пинцета со сфокусированным лазерным пучком, позволяющим удерживать микрочастицы по двум координатам.

#### Постановка задачи

В оптико-акустических пинцетах через поглощающую жидкость распространяется модулированное лазерное излучение. При поглощении излучения в результате ОА-эффекта создается акустическое поле, которое взаимодействует со взвешенной в жидкости малой частицей. При определенной геометрии термооптического возбуждения в акустическом поле будет образоваться «потенциальная яма», в которой возможно удержание частицы.

Рассмотрим однородную невязкую жидкость со взвешенной малой частицей радиусом  $r_s$ , находящуюся на расстоянии  $r$  от начала координат  $O$  (рис. 1). Пусть через жидкость вдоль оси  $z$  распространяется однододовое лазерное излучение, пространственно-временное распределение интенсивности которого описывается выражением:

Малинский Тарас Владимирович, ст. научн. сотр.

Хомич Владислав Юрьевич, зам. директора.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Тел.: (499) 1351195. E-mail: tm2@newmail.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2013 г.

© Малинский Т.В., Хомич В.Ю., 2013

$$I(r, z, t) = \frac{E_0}{w^2(z)} \exp\left(\frac{-r^2}{w^2(z)}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \exp\left(\frac{-t^2}{\tau^2}\right), \quad (1)$$

где  $E_0$ ,  $2\tau$  — энергия и характерная длительность лазерного импульса,  $w(z)$  — радиус сечения лазерного пучка на расстоянии  $z$  от перетяжки. Для одномодового излучения радиус пучка  $w$  на расстоянии  $z$  от плоскости перетяжки определяется по формуле:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $w_0$  — радиус перетяжки лазерного пучка.

Для лазерных импульсов длительностью до ста наносекунд длина термодиффузии  $\sqrt{4\kappa\tau}$  (здесь  $\kappa$  — температуропроводность) в воде составляет доли микрометра, что намного меньше радиуса лазерного луча и расстояния  $c_0\tau$ , на которое распространился звук ( $c_0$  — скорость звука в среде). Поэтому для описания термооптического процесса возбуждения акустических колебаний в линейном приближении можно использовать уравнение из работы [5]

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \Delta \Phi = \frac{\beta \alpha I(r, z, t)}{\rho c_p}, \quad (3)$$

где  $\Phi$  — скалярный потенциал поля скоростей,  $\Delta \Phi$  — оператор Лапласа,  $\alpha$  — показатель поглощения,  $\rho$  — плотность,  $\beta$  и  $c_p$  — коэффициенты линейного расширения и удельной теплоемкости жидкости. Система уравнений (1–3) в линейном приближении полностью определяет акустическое поле, возбуждаемое в среде под действием модулированного лазерного излучения.

Известно, что на частицы, находящиеся в акустическом поле, действует сила радиационного давления. Для малой сферической частицы в работе [6] получили следующее выражение для  $U$  — потенциала сил вида  $\mathbf{F} = -\nabla U$ :

$$U = 2\pi r_s^3 \rho \left( \frac{\overline{\rho_\pi^2}}{3\rho^2 c_0^2} f_1 - \frac{\overline{v_\pi^2}}{2} f_2 \right), \quad (4)$$

где  $\overline{\rho_\pi^2}$ ,  $\overline{v_\pi^2}$  — средние значения квадрата колебаний давления и скорости в волне в точке нахождения частицы,  $f_1$  и  $f_2$  — постоянные, определяемые физическими параметрами среды и частицы:

$$f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_s^2 \rho_s}, \quad f_2 = 2 \frac{\rho_s - \rho}{2\rho_s + \rho}, \quad (5)$$

где  $\rho_s$  и  $c_s$  — плотность и скорость звука в частице.

Из уравнения (4) видно, что потенциал силы зависит от разности двух величин, пропорциональных потенциальной и кинетиче-

ской энергии частиц в акустической волне. Пространственное распределение последних можно менять, изменяя геометрию зоны оптико-акустического преобразования и длительность лазерного импульса. Следовательно, можно получить «потенциальную яму», в которой возможно удержание частицы.

### Результаты расчетов

Для оценки эффективности ОА-микроманипулятора и исследования возможности удержания микрочастиц было рассчитано пространственное распределение потенциала усредненной силы радиационного давления, действующей в воде (плотность — 1000 кг/м<sup>3</sup>, скорость звука — 1500 м/с) на взвешенные малые частицы из полистирола (плотность — 1080 кг/м<sup>3</sup>, скорость звука — 2350 м/с) диаметром 1 мкм.

Акустическое поле возбуждалось лазерными импульсами с энергией 5 мкДж, длиной волны 1,06 мкм и диаметром перетяжки 4 мкм (по уровню  $1/e^2$ ). Показатель поглощения лазерного излучения в жидкости был взят равным  $0,2 \text{ см}^{-1}$ . Требуемый показатель поглощения может быть получен путем добавления в воду соответствующего красителя.

Одномодовое лазерное излучение осесимметрично, поэтому использовались только координаты  $(r, z)$  в цилиндрической системе (см. рис. 1). Для удобства представления и анализа результатов расчетов были введены безразмерные расстояния  $r = r/w_0$ ,  $z = z/w_0$  и безразмерная длительность лазерного импульса  $\tau = \tau c_0/w_0$ . Скалярный потенциал поля скоростей определялся из уравнения (3) в цилиндрической системе координат  $(r, z)$  псевдоспектральным методом [7]. Решение искалось в области  $r \in [0, 25]$ ,  $z \in [-100, 100]$ . Для уменьшения влияния волн, отраженных от границ вычислительной области, использовался первый порядок аппроксимации поглощающих граничных условий Энквиста и Майды [8]. Из потенциала  $\Phi$  рассчитывались поля скоростей и давления по уравнениям  $\mathbf{v} = \nabla \Phi$  и  $p = -\rho \partial \Phi / \partial t$ . Из распределений скорости и давления определялись градиент силы и сила.

Анализ результатов расчетов показывает, что ОА-пинцет со сфокусированным лазерным пучком может работать в двух режимах. Первый режим соответствует малым значениям безразмерной длительности лазерного импульса. Характерное для этого режима пространственное распределение нормированного потенциала силы приведено на рис. 2, а. Видно, что сила всегда действует по направлению

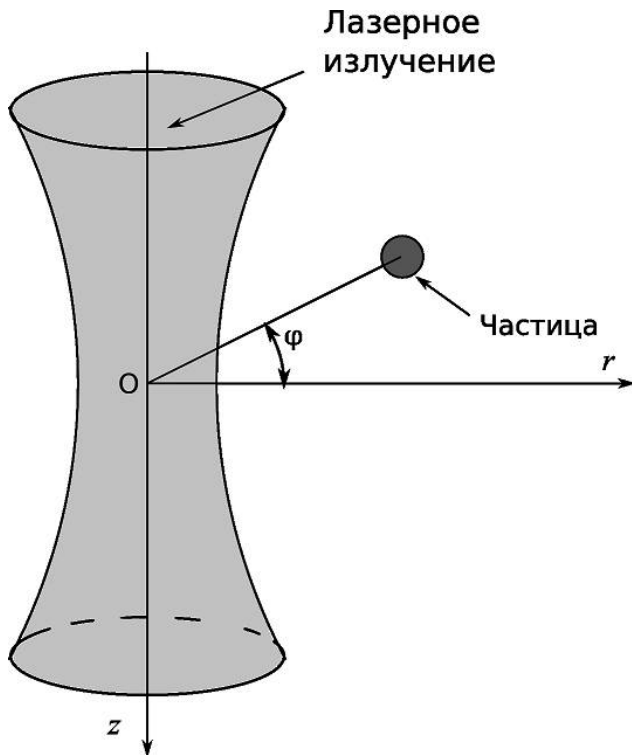
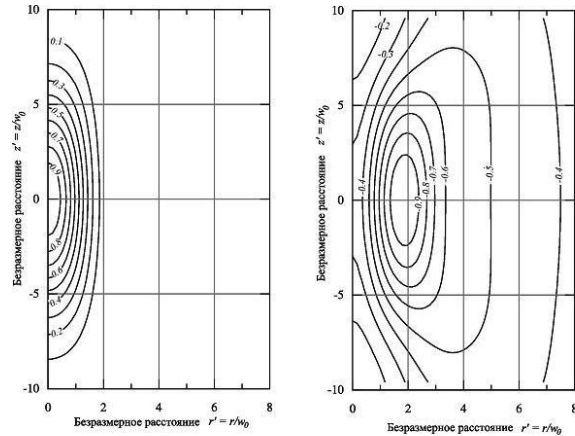


Рис. 1. Оптико-акустический пинцет со сфокусированным пучком и малая сферическая частица

от центра перетяжки лазерного пучка. Для лазерного излучения с длительностью импульса  $\tau = 1$  и частоте следования лазерных импульсов 10 кГц максимальное усредненное значение силы составляет  $3,1 \cdot 10^{-16}$  Н. В невязкой среде эта сила обеспечила бы ускорение  $\mathbf{a} = \mathbf{F} / (4/3 \pi r_s^3 \rho_s)$  полистироловой частицы диаметром 1 мкм до  $0,5$  м/с<sup>2</sup>. Это говорит о том, что ОА-пинцеты способны развивать силы, достаточные для управления положением микрочастиц.

Увеличение безразмерной длительности приводит к появлению «потенциальной ямы», в которой возможно или удержание частицы, или перемещение последней вслед за лучом по заданной траектории. Центр ямы находится в плоскости перетяжки на расстоянии порядка  $2\omega_0$  от оси лазерного пучка. Соответствующее этому случаю пространственное распределение потенциала силы для значения  $\tau = 5$  приведено на рис. 2, б.

Оба режима достаточно просто реализовать на практике. В частности, при диаметре перетяжки луча 4 мкм безразмерная величина  $\tau = 5$  соответствует длительности импульса 13 нс, т.е. в ОА-пинцетах можно использовать лазеры наносекундного диапазона длительностей импульса. Оптико-акустический пинцет также не предъявляет особых требований к оптической системе, легко может быть встроен в микроскоп и позволяет эффективно, по срав-



а

б

Рис. 2. Пространственное распределение нормированного потенциала усредненной силы радиационного давления при возбуждении акустического поля лазерным излучением с перетяжкой диаметром 4 мкм и безразмерной длительностью  $\tau' = 1$  (а) и  $\tau' = 5$  (б).

нению с оптическими микроманипуляторами, решать задачи управления положением непрозрачных объектов с микронными размерами.

### Заключение

Предложенный ОА-пинцет со сфокусированным лазерным пучком при приемлемых частоте и энергии импульса лазерного излучения может воздействовать на взвешенные в воде полистироловые частицы диаметром порядка 1 мкм силой более  $10^{-16}$  Н. Абсолютная величина силы мала, однако она позволяет перемещать в невязкой среде микрочастицы с ускорением до  $0,5$  м/с<sup>2</sup>. В дальнейшем усредненная сила радиационного давления может быть увеличена при использовании более эффективных нелинейных ОА-механизмов генерации акустических волн.

Для определенных соотношениях длительности импульса и диаметра перетяжки лазерного пучка образуется потенциальная яма, в которой частица может или удерживаться по двум координатам, или перемещаться по заданной траектории за лазерным лучом. Потенциальная яма находится рядом с границей лазерного пучка, что позволяет значительно снизить тепловое воздействие на клетки и использовать ОА-пинцет для управления положением непрозрачных частиц.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, грант № 13-08-01146).*

### Литература

1. Ashkin A., Dziedzic J. M., Yamane T. // Nature. 1987. V. 330. P. 769.

2. Neuman K.C., Block S.M. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 2787.
3. Zharov V.P., Malinsky T.V., Alekhnovich V.I. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 779.
4. Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C. // Journ. Phys. D. 2005. V. 38. P. 2662.
5. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991.
6. Горьков Л.П. // Докл. Акад. Наук СССР. 1961. Т. 140. С. 88.
7. Boyd J.P. Chebyshev and Fourier Spectral Methods. N. Y.: Dover Press, 2001.
8. Engquist, Majda. A. // Math. Comp. 1977. V. 31. P. 629.

## Optoacoustic tweezers with focused laser beam

*T.V. Malinsky and V.Yu. Khomich*

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences  
18 Dvortzovaya Naberezhnaya, Saint-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: tm2@newmail.ru

***The possibilities of the opto-acoustic tweezers with a focused laser beam to control the position of microparticles suspended in a liquid are studied. The estimation of the average radiation pressure force acting on a small spherical particle is presented. It is shown that changing the laser radiation geometry you can change not only the amplitude of the average acoustic force, but also its direction, making it possible to move and hold the microparticles at the definite distance from the beam axis in the plane of the laser beam's waist.***

PACS: 43.35.Ud, 43.25.Qp

*Keywords:* optoacoustic, acoustic fields, micromanipulators, potential well, microparticles

Bibliography – 8 references

*Received June 28, 2013*