

Лазерный оптико-акустический микроманипулятор для газовых пузырьков

© Т.В. Малинский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен оптико-акустический микроманипулятор со сфокусированным лазерным пучком. Приведены пространственные распределения потенциала усредненной силы радиационного давления микроманипулятора. Показано, что в возбуждаемом акустическом поле газовый пузырек стремится двигаться к центру перетяжки лазерного излучения.

Ключевые слова: лазеры, микроманипуляторы, газовый пузырек, оптико-акустический эффект, радиационное давление.

Введение. Газовые пузырьки микронных и субмикронных размеров широко применяются в микрогидравлических системах, используемых для медико-биологических исследований и в электронной промышленности. В частности, в системах lab-on-a-chip пузырьки используют в микронасосах, создающих поток жидкости [1], для перемещения частиц малых размеров, в том числе клеток [2], а также для перемешивания жидкостей в микрообъемах [3]. Поэтому задача разработки новых методов управления пространственным положением пузырьков актуальна.

Перемещение пузырька по заданной траектории и фиксация его в определенной области осуществляется микроманипуляторами (пинцетами). Наиболее часто применяют оптические [4] и акустические [5] пинцеты, однако этим устройствам присущи недостатки [6]. Для оптических микроманипуляторов требуется сложная оптическая система с дифракционными оптическими элементами или фемтосекундный лазер [7], а акустические пинцеты обладают малой точностью позиционирования и для них необходимо наличие акустического контакта.

Перспективными для перемещения и удержания пузырьков являются оптико-акустические (ОА) пинцеты [8, 9]: они бесконтактны, отсутствует потребность в дорогих фемтосекундных лазерах и сложных оптических системах, с их помощью можно перемещать пузырек по заданной траектории или удерживать его в требуемой области пространства.

В данной работе рассмотрен ОА-микроманипулятор со сфокусированным лазерным пучком, позволяющий удерживать газовые пу-

зырьки в заданной области пространства; проведена оценка силы, с которой ОА-пинцет действует на частицу; получено пространственное распределение потенциала усредненной силы радиационного давления.

Постановка задачи и основные теоретические положения.

В ОА-пинцете удержание пузырька в требуемом месте и перемещение по заданной траектории осуществляется под действием усредненной силы радиационного давления, действующей на взвешенные в жидкости частицы в присутствии акустических полей. Под действием этой силы находящийся в жидкости газовый пузырек будет стремиться занять определенное положение.

Рассмотрим сфокусированный лазерный пучок, проходящий через слабопоглощающую жидкость (рис. 1). Пусть на расстоянии r от оси пучка находится газовый пузырек микронных или субмикронных размеров, а плоскость перетяжки проходит через центр координат. Оценим силу, действующую на пузырек со стороны звукового поля, образовавшегося в результате ОА-эффекта.

Термооптическое возбуждение звука наиболее эффективно при использовании коротких лазерных импульсов. Для импульсов с длительностью до нескольких десятков наносекунд длина термодиффузии $\sqrt{4\kappa\tau}$ (κ — теплопроводность жидкости; τ — характерная длительность лазерного импульса) в воде составляет доли микрометра. Это намного меньше радиуса лазерного луча и расстояния, на кото-

рое распространился звук $c_0\tau$ (c_0 — скорость звука в среде). Для описания процесса термооптического возбуждения акустических колебаний в линейном приближении можно использовать уравнение [10]

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I(r, z, t)}{\rho c_p}, \quad (1)$$

где φ — скалярный потенциал поля скоростей; Δ — оператор Лапласа; α — показатель поглощения жидкости; ρ — плотность жидкости; β и c_p — коэффициенты линейного расширения и удельной теплоемкости жидкости; $I(r, z, t)$ — пространственное распределение интенсивности лазерного излучения. Для распространяющегося вдоль

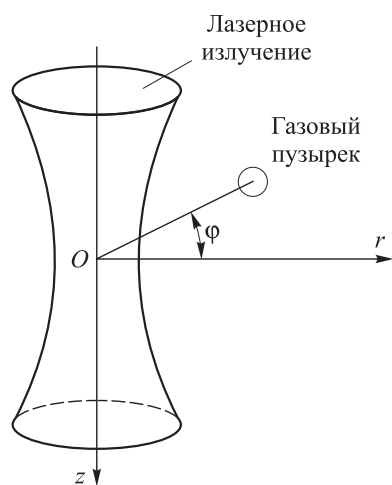


Рис. 1. Схема АО-микроманипулятора со сфокусированным лазерным пучком и газовым пузырьком

оси z одноимового лазерного излучения пространственно-временное распределение интенсивности описывается выражением

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

Здесь E_0 — энергия лазерного импульса; $w(z)$ — радиус сечения лазерного пучка в точке с координатой z , определяемый по формуле

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (3)$$

где λ — длина волны излучения; w_0 — радиус перетяжки лазерного пучка.

Система уравнений (1)–(3) в линейном приближении полностью определяет акустическое поле, возбуждаемое в среде в результате ОА-эффекта под действием импульсного лазерного излучения. Действие этого поля на частицы можно выразить через U — потенциал сил $\mathbf{F} = -\nabla U$ [11]:

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

Здесь r_s — радиус пузырька; $\overline{p_s^2}$, $\overline{v_s^2}$ — средние значения квадрата колебаний давления и скорости в волне в точке нахождения пузырька; f_1 и f_2 — постоянные, определяемые физическими параметрами среды и пузырька:

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

где ρ_s и c_s — плотность пузырька и скорость звука в нем.

Входящие в уравнение (4) скорости и давления в звуковом поле находим из пространственного распределения потенциала скоростей по уравнениям $\mathbf{v} = \nabla \phi$ (∇ — оператор набла) и $p = -\rho \partial \phi / \partial t$.

Газ в пузырьке будем считать идеальным. Тогда его плотность

$$\rho_s = \frac{p_s}{RT}, \quad (6)$$

где R — газовая постоянная; T — температура газа.

С учетом сил поверхностного натяжения давление газа внутри пузырька

$$p_s = p_0 + \sigma/2r_s, \quad (7)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Система уравнений (1)–(7) с точностью до членов второго порядка описывает силу, прикладываемую ОА-пинцетом к газовому пузырьку.

Одномодовое лазерное излучение осесимметрично, поэтому решение целесообразно искать в координатах (r, z) цилиндрической системы (см. рис. 1). Для удобства представления и анализа результатов расчетов введем безразмерные расстояния $r' = r/w_0$, $z' = z/w_0$ и безразмерную длительность лазерного импульса $\tau' = \tau c_0 / w_0$. Для решения уравнения (3) используем псевдоспектральный метод [12]. Ограничим вычислительную область диапазоном $r' \in [0, r'_{\max}]$, $z' \in [-z'_{\max}, z'_{\max}]$. Введем по координатам r' и z' сетку в квадратурных точках Чебышева — Гаусса — Лобатто. В узлах сетки уравнение (1) запишется в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c_0^2 \left(\frac{1}{r} D_r (r D_r \varphi) + D_z^2 \varphi + \frac{\beta \alpha I(r, z, t)}{\rho c_p} \right), \quad (8)$$

где D_r — оператор первой производной по координате r ; D_z^2 — оператор второй производной по координате z . Дополним уравнение (8) начальными

$$\varphi(t = t_0) = 0; \quad \frac{\partial \varphi(t = t_0)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

и граничными условиями, для которых используем аппроксимации поглощающих граничных условий Энквиста и Майды первого порядка [13]:

$$\left(c_0 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial t} + \frac{c_0}{2r_{\max}} \right) \varphi(r = r_{\max}) = 0; \quad (10)$$

$$\left(c_0 \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \varphi(z = \pm z_{\max}) = 0. \quad (11)$$

Таким образом, вычисление усредненной силы радиационного давления осуществляется путем определения скалярного потенциала поля скоростей из уравнений (8)–(11). Далее рассчитываем усредненные по времени квадраты скоростей и давлений в акустическом поле. Подстановкой последних в (4) находим распределение потенциала силы, с которой ОА-пинцет воздействует на газовый пузырек.

Результаты расчета и их анализ. Для оценки эффективности ОА-микроманипулятора и исследования возможности перемещения и удержания газовых пузырьков было рассчитано пространственное распределение действующего в воде (плотность — $1\,000\text{ кг/м}^3$; скорость звука — $1\,500\text{ м/с}$) потенциала усредненной силы радиационного давления на воздушный пузырек диаметром 1 мкм . Акустическое поле возбуждали лазерными импульсами (энергия 5 мкДж , длина волны $1,06\text{ мкм}$, диаметр перетяжки 4 мкм по уровню $1/e^2$). Показатель поглощения лазерного излучения в жидкости взят равным $0,2\text{ см}^{-1}$. Требуемый показатель поглощения может быть получен путем добавления в воду соответствующего красителя. В расчетах также использованы следующие параметры: скорость звука в воздухе — 340 м/с ; коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 0,072\text{ Н/м}$. Давление газов внутри пузырька диаметром 1 мкм , рассчитанное по формулам (6)–(7), составило величину порядка $2,4$ атмосферы. Приняв плотность воздуха $1,2\text{ кг/м}^3$ при атмосферном давлении, получим плотность воздуха $2,9\text{ кг/м}^3$ внутри газового пузырька. Давлением насыщенных паров воды внутри пузырька пренебрегаем. Поиск решения проводили в области $r' \in [0, 25]$, $z' \in [-100, 100]$.

Характерные пространственные распределения нормированного потенциала силы для лазерных импульсов с безразмерной длительностью $\tau' = 1$ и $\tau' = 5$ приведены на рис. 2: сила всегда действует по направлению точно к центру перетяжки лазерного пучка. Это позволяет проводить удержание пузырька по трем координатам в центре перетяжки или перемещение пузырька вслед за лазерным лучом по заданной траектории в пространстве. Для лазерного излучения с безразмерной длительностью импульса $\tau' = 1$ при частоте следования лазерных импульсов 10 кГц (что при энергии в импульсе 5 мДж соответствует средней мощности излучения 50 мВт) максимальное усредненное значение силы составляет $2,9\text{ пН}$. Эффективность ОА-пинцетов сравнима с эффективностью современных оптических устройств, которые развивают для частиц микронных размеров силы порядка 1 пН на 10 мВт мощности лазера [14].

Положение потенциальной ямы для газовых пузырьков (см. рис. 2) не зависит от длительности импульса. При изменении длительности изменяется только амплитуда при сохранении направления силы, что позволяет использовать в ОА-микроманипуляторах лазеры с различными длительностями импульсов. Приведенным на рис. 2 графикам соответствуют длительности импульсов $5\dots 50\text{ нс}$. Для управления положением газовых пузырьков можно использовать любой лазер с длительностью, лежащей в данном диапазоне значений.

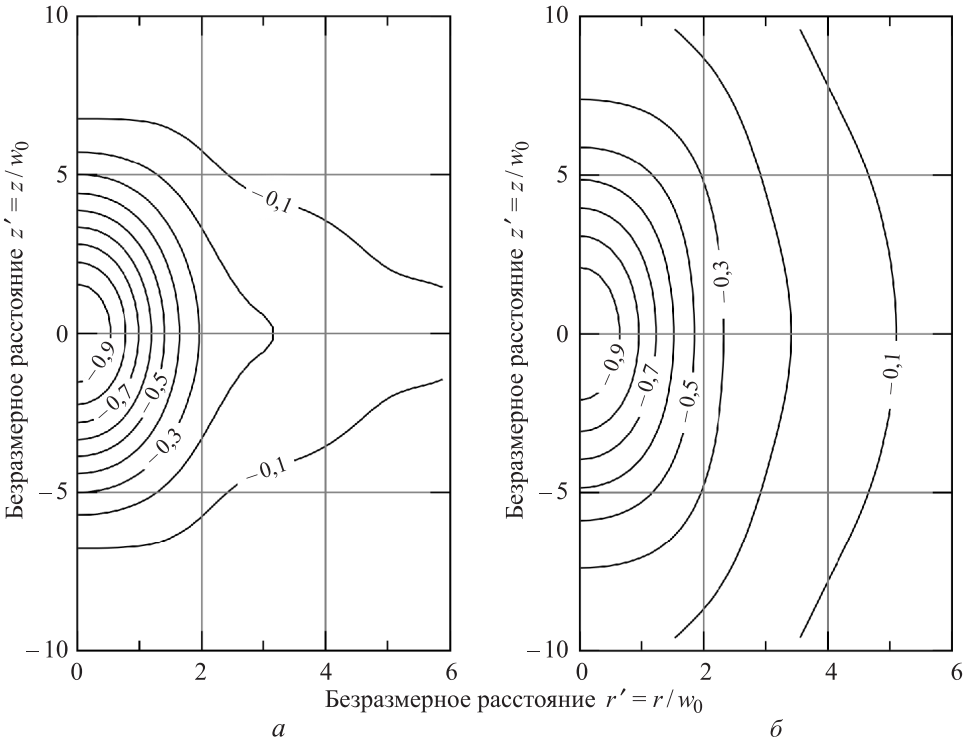


Рис. 2. Пространственное распределение потенциала усредненной силы давления ОА-пинцета на газовый пузырек для импульса безразмерной длительности $\tau' = 1$ (а) и $\tau' = 5$ (б)

Положение потенциальной ямы не изменяется также и при изменении диаметра перетяжки лазерного излучения. Поэтому в ОА-пинцетах можно использовать простую оптическую систему, создающую лазерный пучок с перетяжкой в диапазоне от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров.

Заключение. Таким образом, ОА-пинцет со сфокусированным лазерным пучком при приемлемых частоте и энергии импульса лазерного излучения может воздействовать на взвешенные в воде газовые пузырьки диаметром порядка 1 мкм силой ~ 3 пН, что позволяет удерживать пузырьки в требуемой области или перемещать их по заданной трехмерной траектории. Такой же порядок сил дают более сложные современные оптические пинцеты.

Положение потенциальной ямы, находящейся всегда в центре перетяжки лазерного пучка, не зависит от длительности импульса и диаметра перетяжки. Благодаря этому возможно использование практически любых лазеров с длительностью импульса от единиц до сотен наносекунд. Также ОА-пинцет может быть встроен практически в любую оптическую систему.

В микроскоп нетрудно встроить ОА-микроманипулятор, с помощью которого удастся эффективно, по сравнению с оптическими

пинцетами, решать задачи управления положением газовых пузырьков микронных и субмикронных размеров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kao J., Wang X., Warren J., Xu J., Attinger D. A bubble-powered micro-rotor: conception, manufacturing, assembly and characterization. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, vol. 17, no. 12, pp. 2454.
- [2] Marmottant P., Hilgenfeldt S. A bubble-driven microfluidic transport element for bioengineering. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS*, 2004, vol. 101, no. 26, pp. 9523–9527.
- [3] Liu R., Yang J., Pindera M., Athavale M., Grodzinski P. Bubble-induced acoustic micromixing. *Lab Chip*, 2002, vol. 2, no. 3, pp. 151–157.
- [4] Ashkin A., Dziedzic J.M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. *Nature*, 1987, vol. 330, no. 6150, pp. 769–771.
- [5] Wu J.R. Acoustical tweezers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, vol. 89, pp. 2140–2143.
- [6] Nilsson J., Evander M., Hammarström B, Laurell T. Review of cell and particle trapping in microfluidics systems. *Analytica Chimica Acta*, 2009, vol. 649, pp. 141–157.
- [7] Oshemkov S.V., Dvorkin L.P., Dmitriev V.Y. Trapping and manipulating gas bubbles in water with ultrashort laser pulses at a high repetition rate. *Tech. Phys. Lett.*, 2009, vol. 35, no. 3, pp. 282–285.
- [8] Zharov V., Malinsky T., Alekhovich V. Photoacoustic manipulation of particles and cells. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, vol. 74, pp. 779–781.
- [9] Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C. Photoacoustic tweezers with a pulsed laser: theory and experiments. *Journal of Physics D: Applied Physic*, 2005, vol. 38, no. 15, pp. 2662.
- [10] Гусев В.Э., Карабутов А.А. *Лазерная оптоакустика*. Москва, Наука, 1991, 304 с.
- [11] Горьков Л.П. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости. *Докл. Академии наук СССР*, 1961, т. 140, с. 88–91.
- [12] Boyd J.P. *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*. Toronto, Dover Publ., 2001, 688 p.
- [13] Engquist B., Majda A. Absorbing boundary conditions for numerical simulation of waves. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1977, vol. 74, no. 5, pp. 1765–1766.
- [14] Neuman K.C., Block S.M. Optical trapping. *Review of Scientific Instruments*, 2004, vol. 75, no. 9, pp. 2787–2809.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Малинский Т.В. Лазерный оптико-акустический микроманипулятор для газовых пузырьков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/825.html>

Малинский Тарас Владимирович родился в 1964 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Работает в областях оптико-акустики, наноструктурирования и микрообработки. Автор более 20 научных работ. e-mail: tm2@newmail.ru