

03;07

## Оптическая термокапиллярная ловушка для пузырька

© Н.А. Иванова, Б.А. Безуглый

Тюменский государственный университет  
E-mail: nivanova@utmn.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2006 г.

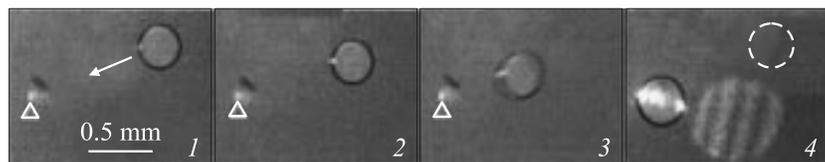
Продемонстрирован захват газового пузырька пучком лазера в слое поглощающей жидкости, зажатом между двумя пластинами с использованием термокапиллярной силы. Такая ловушка позволяет захватывать пузырьки, которые удалены от пучка на расстояние в 10 его диаметров. Обнаружен эффект ускорения пузырька и измерена его скорость как функция расстояния до проекции пучка лазера в слой. Величина силы, развиваемой термокапиллярной ловушкой, превышает 10 nN.

PACS: 47.55.dd, 47.55.dm, 87.80.Cc

Известно, что оптический пинцет [1,2], используемый для захвата взвешенных в жидкости диэлектрических микрочастиц, неприменим, если их показатель преломления меньше, чем у жидкости (например, газовый пузырек). Недавно предложен ряд решений этой проблемы, которые основаны на использовании так называемых вихревых оптических пучков [3] или оптических пинцетов, образованных путем интерференции двух пучков [4]. Однако существует и другая проблема, связанная с тем, что микрочастица не испытывает действия силы электрического поля сфокусированного лазера, если она находится вне зоны его каустики.

В работе показана возможность оптического захвата пузырька, расположенного в тонком слое поглощающей жидкости за пределами каустики пучка лазера. Механизм движения пузырька обусловлен действием термокапиллярной силы, зависящей от градиента температуры, создаваемого в жидкости нагревом пучком лазера.

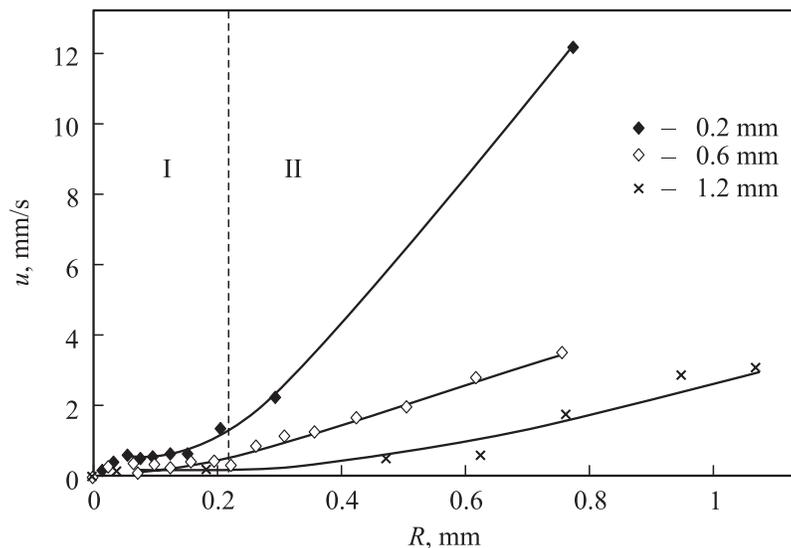
В опытах использовали квадратную ячейку  $2.0 \times 2.0$  см с зазором  $50 \mu\text{m}$ , верхняя и нижняя пластины которой сделаны из оргстекла. Зазор заполняли раствором бриллиантового зеленого в этаноле, так,



**Рис. 1.** Движение пузырька с ускорением в пучок лазера (помечен белым треугольником). Интервал между кадрами 1 и 4 равен 0.48 s. На кадре 4 штрихлиния — начальное положение пузырька; интерференционная картина образована отражением пучка от смачивающей пленки между пузырьком и стенкой ячейки.

что в нем оставались газовые пузырьки диаметром  $0.2 \dots 1.2$  mm, а между пластинами и пузырьками всегда находилась пленка смачивания. Излучение полупроводникового лазера (20 mW, 659 nm) фокусировали в слой (до диаметра около 0.2 mm) раствора на некотором расстоянии  $R$  от границы пузырька в ячейке, расположенной горизонтально на столике микроскопа, и ждали, когда он начнет движение в сторону пучка. Когда пузырек достигал пучка и локализовался в нем, пучок перекрывали, ячейку смещали примерно на 0.3 mm вдоль столика относительно начального положения и повторяли опыт снова. Протекающие процессы записывали через микроскоп видеокамерой (560 lpm,  $25 \text{ s}^{-1}$ ), соединенной через тюнер с компьютером для оцифровки видеосигнала.

Установлено, что через время от 0.1 до 3.5 s после фокусировки пучка лазера в слой раствора на расстояниях от 0.4 до 1.2 mm от границы пузырька он начинает медленно двигаться в направлении пучка. Пройдя путь около  $R/3$  (участок I) пузырек заметно ускоряется (участок II), входит в пучок и центрируется в его фокусе. Пузырек в фокусе пучка устойчив и удерживается там неограниченное время. На рис. 1 показана серия кадров движения пузырька со средней скоростью 1.6 mm/s в пучок, расположенный от боковой границы пузырька на  $R \cong 0.8$  mm, а на рис. 2 даны зависимости скорости пузырька от расстояния  $R$ . Значение максимальной скорости соответствует координате фокуса пучка. После того как ведущая боковая поверхность пузырька пересекает пучок, скорость пузырька резко падает до нуля и он локализуется в пучке. На участке I скорость пузырька мало зависит



**Рис. 2.** Скорость пузырьков  $u$  разного диаметра в зависимости от расстояния  $R$  до проекции пучка лазера в слой.

от его диаметра, а на участке II размер пузырька существенно влияет на его скорость. Ускорение малых пузырьков происходит быстрее, скорость же больших пузырьков растет плавно и достигает меньших значений.

Эффект ускорения пузырька обусловлен, по-видимому, возникающим в слое неоднородным тепловым полем с резким максимумом в области падения пучка на слой. В таком поле температура жидкости на максимальном удалении от проекции пучка на слой равна температуре окружающей среды. Отсюда следует, что тепловое действие пучка имеет некий конечный радиус действия, ограниченный изотермой, создающей минимальный градиент температуры между полюсами пузырька, достаточный, чтобы вызвать его движение. Проверка этого предположения путем измерения радиуса действия показала, что действительно существует предельное расстояние  $R^*$  положения пучка от границы пузырька, дальше которого при нагреве слоя в течение

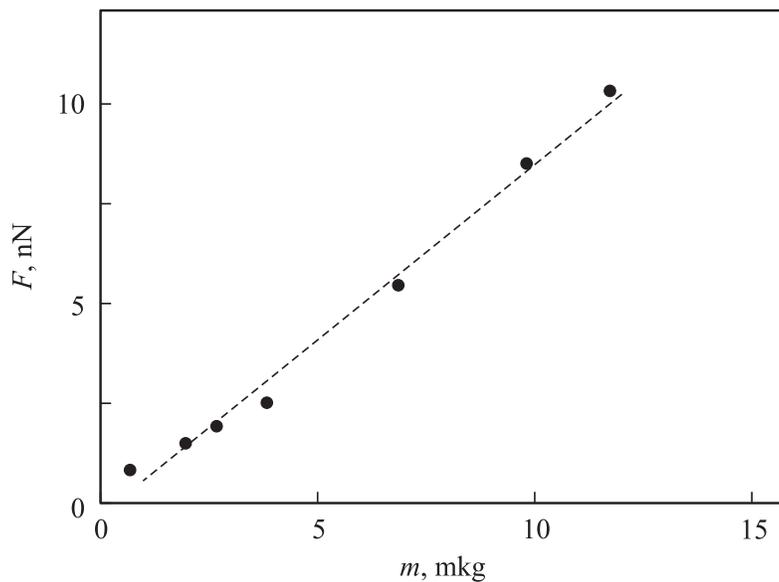
нескольких минут движения пузырька не наблюдается. Для всего диапазона диаметров исследуемых пузырьков это расстояние лежит в пределах  $R^* \cong 1 \dots 1.5 \text{ mm}$ .

Описанное поведение пузырька, с момента облучения и до его локализации в пучке, характерно для всего диапазона диаметров исследованных здесь пузырьков и разных окрашенных жидкостей.<sup>1</sup> В прозрачных жидкостях движение пузырьков не наблюдалось.

Изучаемое здесь взаимодействие пучка света с пузырьком можно назвать эффектом захвата пузырька пучком света с помощью термокапиллярных сил или, короче, оптической термокапиллярной ловушкой. Действие такой ловушки состоит в следующем: в поглощающем излучение слое жидкости при его локальном нагреве возникает неоднородное тепловое поле, которое распространится путем кондукции. Если в этом слое находится пузырек, то между противоположными полюсами его боковой поверхности, лежащими на одной прямой с зоной нагрева, возникает перепад температуры. В свою очередь, этот перепад создает вдоль боковой поверхности пузырька касательные напряжения  $\sigma_T \nabla T$ , которые за счет вязкого взаимодействия с жидкостью вынуждают пузырек двигаться в сторону максимума температуры. Здесь  $\sigma_T$  — температурный коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\nabla T$  — градиент температуры между полюсами пузырька. Устойчивое положение пузырька в пучке можно объяснить отсутствием тепловых возмущений вдоль его боковой поверхности, обусловленным симметрией поля температуры, вызванного локальным нагревом пленки смачивания под пузырьком.

Силу термокапиллярной ловушки можно оценить по формуле  $F = ma$ , где  $a$  — ускорение пузырька, а  $m$  — его присоединенная масса — количество жидкости, которую он приводит в движение при перемещении в пучок. Ускорение пузырька представим в виде  $a = 2\Delta R/t^2$ , где  $\Delta R$  — длина участка II (рис. 2), а  $t$  — время на этом участке. Присоединенная масса шайбовидного пузырька равна массе вытесненной им жидкости  $m = \rho V$ , где  $\rho$  — плотность жидкости, а  $V$  — объем пузырька, который равен  $V = \pi D^2 h/4$  [6]. Подставляя в формулу для силы  $F$  выражения  $a$  и  $m$ , получим в результате  $F = \pi D^2 h \Delta R \rho / 2t^2$ .

<sup>1</sup> Эффект захвата пузырька в тонкой ячейке замечен нами при выполнении опытов с растворами дибромиды меди в бутаноле и ацетоне, облучаемыми сфокусированным излучением ртутной лампы [5].



**Рис. 3.** Зависимость термокапиллярной силы  $F$  от присоединенной массы пузырька  $m$ .

На рис. 3 показана зависимость термокапиллярной силы  $F$  от присоединенной массы жидкости. С ростом диаметра пузырька термокапиллярная сила растет почти линейно, что говорит о том, что для пузырьков больших диаметров, начиная примерно с диаметра 0.4 mm, рост силы за счет увеличения присоединенной массы компенсируется снижением скорости пузырька на участке II (рис. 2).

Оптическая термокапиллярная ловушка имеет такие замечательные свойства, как широкий диапазон размеров захватываемых пучком света пузырьков, большой радиус действия, который почти в 10 раз превышает диаметр пучка при термокапиллярной силе, достигающей 10 nN.

На основе предлагаемой оптической термокапиллярной ловушки для пузырька можно разработать метод манипуляции пузырьками и частицами с низким показателем преломления для биомедицинских исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы „Поддержка научного потенциала высшей школы 2006–2008 гг.“.

## Список литературы

- [1] *Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S.* // Optics Letters. 1986. N 11. P. 288.
- [2] *Ashkin A.* // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1997. N 94. P. 4853–4860.
- [3] *Gahagan K.T., Swartzlander G.A.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1999. V. 16. P. 533.
- [4] *MacDonald M.P., Paterson L., Sibbett W., Dholakia K., Bryant P.E.* // Optics Letters. 2001. V. 26. N 12. P. 863–865.
- [5] *Иванова Н.А., Безуглый Б.А.* // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 5. С. 93–99.
- [6] *Иванова Н.А., Безуглый Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 15. С. 76–79.