

03;07

## **Захват и манипулирование газовым пузырьком в воде ультракороткими лазерными импульсами с высокой частотой повторения**

© С.В. Ошемков, Л.П. Дворкин, В.Ю. Дмитриев

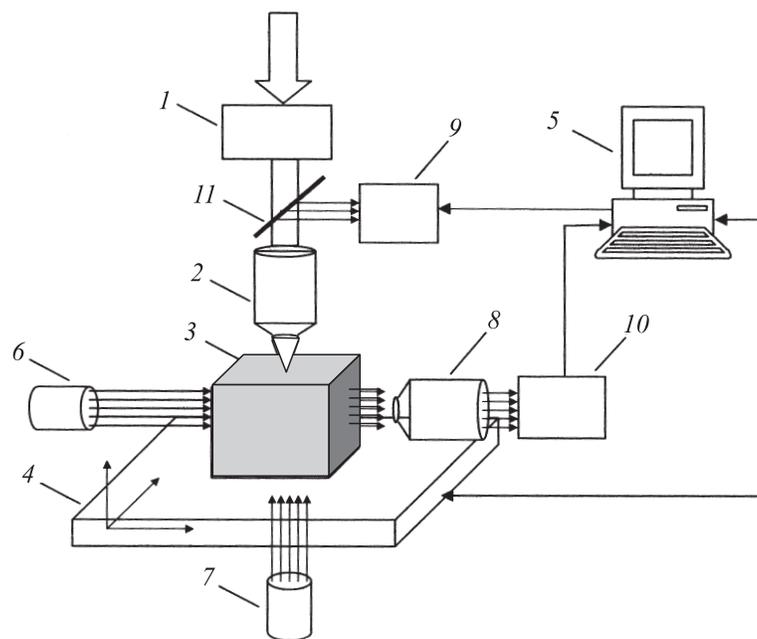
Pixar Technology, 44 Maale Camon, Karmiel 21613 Israel  
Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет  
E-mail: sergey@pixertech.com

Поступило в Редакцию 15 сентября 2008 г.

Экспериментально обнаружен эффект захвата газового пузырька в воде сфокусированным лазерным излучением. Для создания оптической ловушки использовались 200-fs импульсы титан-сапфирового лазера с частотой повторения 100 kHz, сфокусированные в воде объективом с числовой апертурой 0.5. Проведена оценка удерживающей силы в воде  $\sim 200$  pN при средней мощности лазерного излучения 20 mW, что на два порядка превышает эффективность традиционного лазерного пинцета. Удерживающая сила возникает при локальном нагреве газа внутри пузырька за счет нелинейного поглощения в области фокуса объектива.

PACS: 47.55.dd, 47.55.dp, 52.50.Jm, 87.80.Cc

Оптический захват и манипулирование микрочастицами имеет важное значение в микро- и нанотехнологиях, а также в биологических и медицинских исследованиях. Традиционно для этих целей используется оптический пинцет [1] и его различные модификации [2]. В то же время продолжают поиски путей создания оптических ловушек для микрочастиц на принципах, отличных от светового давления. Так, показана возможность захвата и манипулирования пластиковой микросферой диаметром  $90 \mu\text{m}$  при сканировании вокруг нее сфокусированного пучка фемтосекундного лазера [3]. Различные типы оптических ловушек для газовых пузырьков в жидкостях предложены в работах [4–6]. Оптическая термокапиллярная ловушка [4] с использованием полупроводникового лазера (20 mW, 569 nm) позволяет захватывать и удерживать



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки.

в поглощающих жидкостях газовые пузырьки, удаленные от лазерного пучка на расстояние до 10 диаметров пучка с силой 10 nN. Гибридная ловушка, использующая сфокусированное излучение аргонового лазера [5], удерживает газовые микропузырьки в этаноле. Захват газовых пузырьков в дистиллированной воде наблюдался при самофокусировке в ней ультракоротких лазерных импульсов [6]. Измеренная величина удерживающей силы в направлении лазерного луча составляет 11 pN и в перпендикулярном направлении — 87 pN при средней мощности излучения 210 mW.

В данной работе показана возможность захвата и манипулирования газовым пузырьком в воде излучением фемтосекундного лазера с высокой частотой повторения импульсов, сфокусированным в воде объективом с высокой числовой апертурой.

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Импульсы лазера с длительностью 200 fs и длиной волны 800 nm проходили через варьиру-

емый аттенуатор излучения (1) и фокусировались в дистиллированной воде объективом с числовой апертурой 0.5 (2). Кювета с водой (3) могла перемещаться относительно фокальной точки объектива с помощью трехкоординатной позиционирующей системы (4), управляемой компьютером (5). Установка имела две системы наблюдения в проходящем свете — вдоль и перпендикулярно направлению распространения лазерного излучения. Каждая система содержала источники подсветки (6, 7), объективы (2, 8) и видеокамеры (9, 10). Наблюдение вдоль лазерного луча осуществлялось с помощью дихроичного зеркала (11) через тот же объектив, через который проходило лазерное излучение, возбуждавшее пробой. Подсветка в системе наблюдения перпендикулярно лазерному лучу осуществлялась в режиме полного внутреннего отражения от поверхности воды. В этой системе использовался объектив (8) 10X с числовой апертурой 0.3.

Как известно, при фокусировке лазерного излучения в объеме прозрачной жидкости в результате нелинейного поглощения образуется плазма с последующим возникновением кавитационного газового пузырька. На начальной стадии развития диаметр пузырька быстро изменяется вследствие кавитационных пульсаций. Максимальный радиус пузырька определяется энергией лазерного импульса, а время, проходящее от момента достижения пузырьком максимального радиуса до его схлопывания, рассчитывается по формуле Рэлея:

$$T_c = 0.92 \sqrt{\rho / (p - p_v)} R_{\max},$$

где  $T_c$  — время коллапса пузырька,  $R_{\max}$  — максимальный радиус пузырька,  $p$  — давление окружающей среды,  $p_v$  — давление насыщенного пара и  $\rho$  — плотность жидкости.

Для пузырьков в воде с радиусом  $20 \mu\text{m}$ , типичных для данной работы, время коллапса составляет  $\sim 1.8 \mu\text{s}$ , при этом пузырек до исчезновения или достижения стационарного состояния претерпевал три пульсации [7].

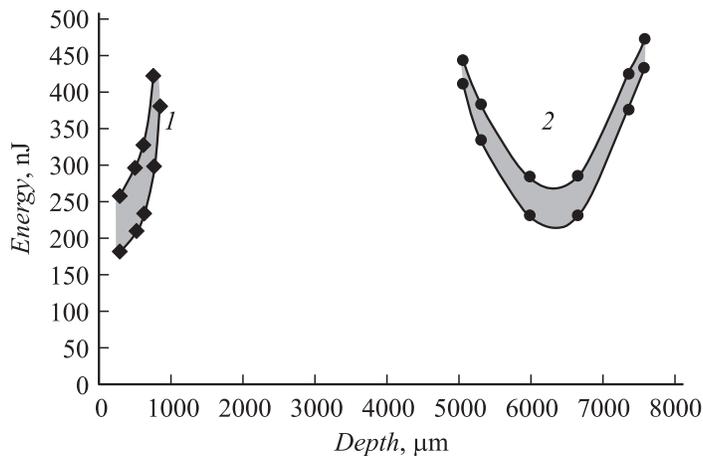
Возбуждение пробоя в объеме воды импульсами с высокой частотой повторения сопровождается разлетом остаточных пузырьков из области пробоя под разными углами. Это связано с хаотической ориентацией кумулятивных микроструй, испускаемых кавитационными пузырьками, созданными последовательностью лазерных импульсов. Таким образом, типичная картина при лазерном пробое в объеме жидкости включает

образование нестационарных кавитационных пузырьков и разлет остаточных пузырьков из зоны пробоя под разными углами.

В результате проведенных экспериментов мы обнаружили, что при фокусировке высокоапертурным объективом в объеме дистиллированной воды лазерных импульсов длительностью 200 fs, частотой повторения 100 kHz и энергией, превышающей порог объемного пробоя воды, наблюдается захват и удержание газового пузырька в воде в области каустики объектива. Захваченный пузырек может находиться в ловушке в устойчивом состоянии неограниченное время. При этом свечение плазмы в фокальной области объектива не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии лазерного пробоя. Исследования динамики удерживаемого пузырька с помощью стробоскопической подсветки по методике [7] показали, что удерживаемый пузырек не испытывает кавитационных пульсаций. Нами обнаружено также, что режим захвата газового пузырька осуществляется только при погружении фокальной точки объектива в воду на расстояние от поверхности, сопоставимое с оптимальной глубиной, для которой сферическая абберрация для данного объектива имеет минимальное значение.

Сказанное выше иллюстрируется рис. 2, на котором представлена диаграмма области существования ловушки в координатах глубина погружения—энергия лазерного импульса для двух объективов. Первый объектив (50X, числовая апертура 0.5) был скомпенсирован на сферическую абберацию на толщину покровного стекла 0.17 mm, второй объектив (50X, числовая апертура 0.55) имел компенсацию сферической абберации на толщину стекла 6.3 mm. Как видно из рис. 2, энергия импульса, необходимая для захвата пузырька, возрастает при удалении от оптимальной глубины для обоих объективов, что свидетельствует о важности острой фокусировки луча для формирования ловушки.

Из рис. 2 видно также, что для первого объектива при малой глубине погружения точки фокуса область существования ловушки ограничена. Это связано со скачкообразным переходом из режима захвата и удержания пузырька к режиму формирования жидкостно-пузырьковой струи [7,8] с приближением области фокусировки лазерного луча к границе раздела вода—воздух (рис. 3). На рис. 3 оба режима реализованы с использованием объектива 50X с числовой апертурой 0.5. Отметим, что одновременно с переходом от удержания пузырька к формированию жидкостно-пузырьковой струи происходит и переход от режима отсутствия лазерного пробоя к пробоям воды каждым

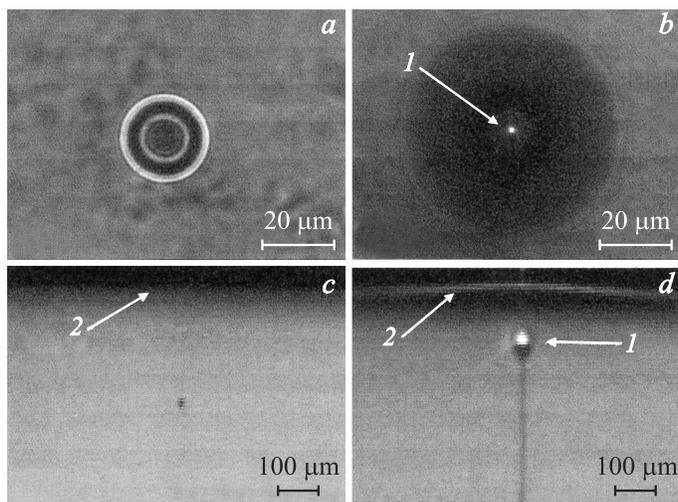


**Рис. 2.** Диаграмма области существования удерживаемого газового пузырька в воде (заштрихованные области): 1 — объектив 50X 0.5 NA с компенсацией сферической аберрации на толщину покровного стекла 0.17 mm; 2 — объектив 50X 0.55 NA с компенсацией сферической аберрации на толщину покровного стекла 6.3 mm. Длительность импульса 200 fs, частота повторения 100 kHz.

лазерным импульсом. Это подтверждается рис. 3, на котором свечение плазмы пробоя наблюдается в случае жидкостно-пузырьковой струи (рис. 3, *b, d*), в то время как в режиме захвата и удержания пузырька такого свечения не наблюдается (рис. 3, *a, c*).

Перемещение удерживаемого пузырька в воде возможно либо при изменении угла падения пучка на фокусирующий объектив, либо при относительном перемещении фокальной точки объектива и кюветы с водой как в направлении падения луча, так и в плоскости, перпендикулярной лучу. Наблюдалось также прилипание микрочастиц размером  $\sim 3\text{--}10\ \mu\text{m}$  к пузырьку и их перемещение вместе с удерживаемым пузырьком, что открывает возможность манипулирования микрообъектами в воде.

Также было показано, что захваченный газовый пузырек имеет температуру, превышающую температуру окружающей среды. Так, с приближением захваченного пузырька к стабильному пузырьку, фиксированному в объеме воды на поверхности покровного стекла, наблюдалось увеличение диаметра фиксированного пузырька из-за на-



**Рис. 3.** Фотографии захваченного газового пузырька (*a, c*) и жидкостно-пузырьковой струи (*b, d*). Вид вдоль лазерного луча (*a, b*) и перпендикулярно лучу (*c, d*). *1* — свечение плазмы пробоя, *2* — поверхность воды.

грева окружающей воды. Таким образом, удерживаемый пузырек может служить источником внутриобъемного локального нагрева воды.

Оценка величины удерживающей силы была проведена нами двумя различными способами. Во-первых, мы исследовали зависимость диаметра удерживаемого пузырька от энергии импульса и выяснили, что при наших условиях эксперимента максимально возможный диаметр стабильно удерживаемого пузырька составляет  $35\ \mu\text{m}$ . При дальнейшем увеличении энергии и соответственно диаметра пузырька происходит его отрыв из области фокуса объектива в направлении действия выталкивающей силы. В этот момент (пренебрегая конвективными потоками в воде) величина удерживающей силы  $F_{tr}$  равна выталкивающей силе:

$$F_{tr} = \rho g V,$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $V$  — объем пузырька,  $g$  — ускорение свободного падения.

Для пузырька радиусом  $17.5\ \mu\text{m}$  подсчитанная таким образом удерживающая сила составляет  $220\ \text{pN}$ .

С другой стороны, оценка удерживающей силы была сделана из результатов эксперимента по максимальной скорости перемещения пузырька диаметром  $20\ \mu\text{m}$  в воде, в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу. В этом случае величина  $F_{tr}$  в момент отрыва пузырька равна силе вязкого трения в воде и может быть подсчитана по формуле Стокса:

$$F_{tr} = 6\pi\eta R_b v,$$

где  $\eta$  — вязкость воды,  $R_b$  — радиус пузырька,  $v$  — скорость перемещения пузырька.

Оказывается, максимальная скорость перемещения составляет  $1.2\ \text{mm/s}$ , что соответствует величине удерживающей силы  $200\ \text{pN}$  и хорошо согласуется с оценкой вертикальной удерживающей силы. Отметим, что данные эксперименты проводились при средней мощности лазерного излучения  $20\ \text{mW}$ . Следовательно, удельная величина удерживающей силы составляет  $10\ \text{pN/mW}$ , что на два порядка превышает соответствующую величину для традиционного оптического пинцета [2].

Исходя из полученных результатов, мы предлагаем следующую модель захвата и удержания газового пузырька в воде ультракороткими лазерными импульсами с высокой частотой повторения, сфокусированными высокоапертурным объективом.

В результате хаотической ориентации кавитации пузырьков (и обусловленных кавитацией микропотоков жидкости), образованных в результате пробоя воды последовательностью лазерных импульсов, остаточный пузырек диаметром несколько микрометров попадает в лазерный луч выше области фокуса объектива в момент прихода очередного лазерного импульса. Образованная пузырьком отрицательная линза блокирует пробой пришедшим лазерным импульсом и таким образом препятствует созданию нового кавитационного пузырька и микропотоков воды, выталкивающих остаточный пузырек из области фокуса. Во время импульса происходит подогрев газа внутри остаточного пузырька за счет нелинейного поглощения, что приводит к увеличению диаметра пузырька и к локализации каустики объектива внутри пузырька.

С приходом следующих импульсов картина повторяется, и пузырек растёт до тех пор, пока мощность теплового потока от него в окружающую воду из-за теплопроводности и конвекции не станет равной средней мощности, идущей на нагрев пузырька вследствие нелинейного поглощения. После установления теплового равновесия пузырек удерживается в области каустики объектива за счет локализованного

внутри пузырька источника нагрева. Любое перемещение пузырька под действием внешних сил от положения равновесия приводит к возникновению возвращающей силы из-за приближения источника нагрева к стенке пузырька.

Предлагаемая ловушка газового пузырька в воде может использоваться для захвата микрообъектов и манипулирования ими в воде, а также как источник локального нагрева воды и микрообъектов в микротехнологиях.

## Список литературы

- [1] *Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S.* // Opt. Lett. 1986. V. 11. N 5. P. 288.
- [2] *Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. В. 6. С. 1368.
- [3] *Jiang Y., Matsumoto Y., Hosokawa Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 061 107.
- [4] *Иванова Н.А., Безуглый Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 19. С. 66.
- [5] *Lü B.L., Li Y.Q., Ni H., Wang Y.Z.* // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 801.
- [6] *Ye J.Y., Guoqing C., Norris T.B. et al.* // Opt. Lett. 2004. V. 29. N 18. P. 2136.
- [7] *Oshemkov S., Dvorkin L., Dmitriev V.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6881. P. 68 811D.
- [8] *Ошемков С.В., Дворкин Л.П., Дмитриев В.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 10. С. 8–14.