

03;07

## **Формирование струи при пробое жидкости ультракороткими лазерными импульсами вблизи границы раздела жидкость—газ**

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

Pixer Technology, 44 Maale Camon, Karmiel 21613 Israel

E-mail: sergey@pixertech.com

Поступило в Редакцию 28 сентября 2007 г.

Исследован лазерный пробой жидкостей ультракороткими (160 fs) лазерными импульсами, сфокусированными в жидкости вблизи плоской и изогнутой границы раздела жидкость—газ. Экспериментально обнаружен эффект формирования слабо расходящейся струи, содержащей пузырьки микронного диаметра и истекающей из зоны лазерного пробоя по направлению от границы раздела в жидкость вдоль нормали к поверхности раздела, проходящей через точку фокусировки луча. Длина струи зависит от расстояния между точкой фокусировки луча и поверхностью раздела, частоты следования и энергии лазерных импульсов и может достигать нескольких сантиметров.

PACS: 52.50.Jm, 47.55.dr, 47.55.dp

Исследованию лазерного пробоя в жидкости и связанных с ним процессов образования лазерной плазмы, распространения ударных волн, образования пузырьков, их кавитации и формирования микропотоков жидкостей посвящено большое количество работ. Пробой создавался импульсами от наносекундной [1] до фемтосекундной [2–4] длительности. Исследовались кавитация одиночных лазерно-индуцированных пузырьков в жидкости и формирование микропотоков вблизи эластичной [5–6] и твердой [7] поверхности. В работе [8] показана возможность использования лазерно-индуцированных кавитационных микропотоков для захвата и манипулирования микрочастицами в жидкости.

В данной работе исследовались особенности лазерного пробоя в жидкости вблизи границы раздела жидкость—газ, инициированного ультракороткими лазерными импульсами.

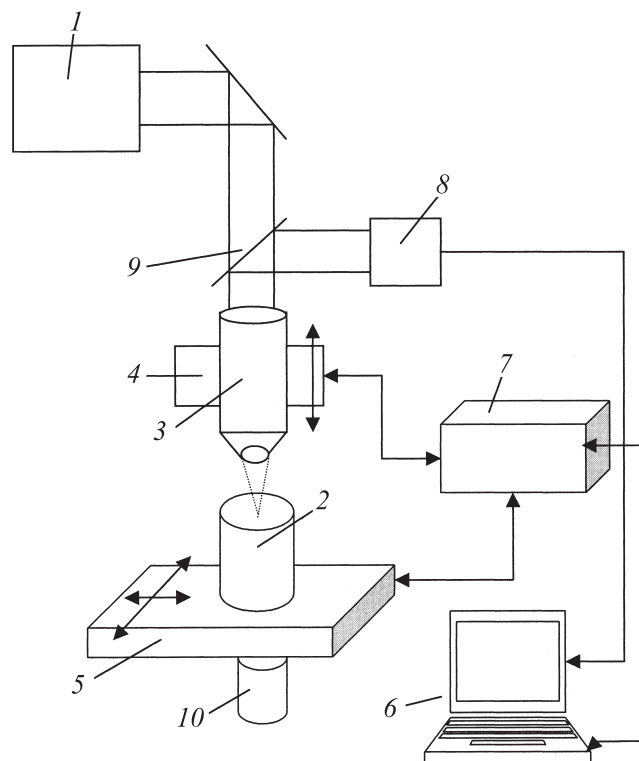


Рис. 1. Схема установки.

Эксперименты проводились на установке, показанной на рис. 1. Излучение титан-сапфирового лазера 1 (длительность импульса 160 fs, энергия в импульсе до  $4 \mu\text{J}$ , длина волны 800 nm, частота повторения импульсов до 300 kHz) фокусировалось в жидкость 2 50-кратным объективом 3 с числовой апертурой 0.5. Относительное перемещение фокальной точки объектива и жидкости с точностью  $1 \mu\text{m}$  осуществлялось с помощью трехкоординатной позиционирующей системы 4, 5, управляемой от компьютера 6 через контроллер 7. Система наблюдения, состоящая из видеокамеры 8, дихроичного зеркала 9 и подсветки 10

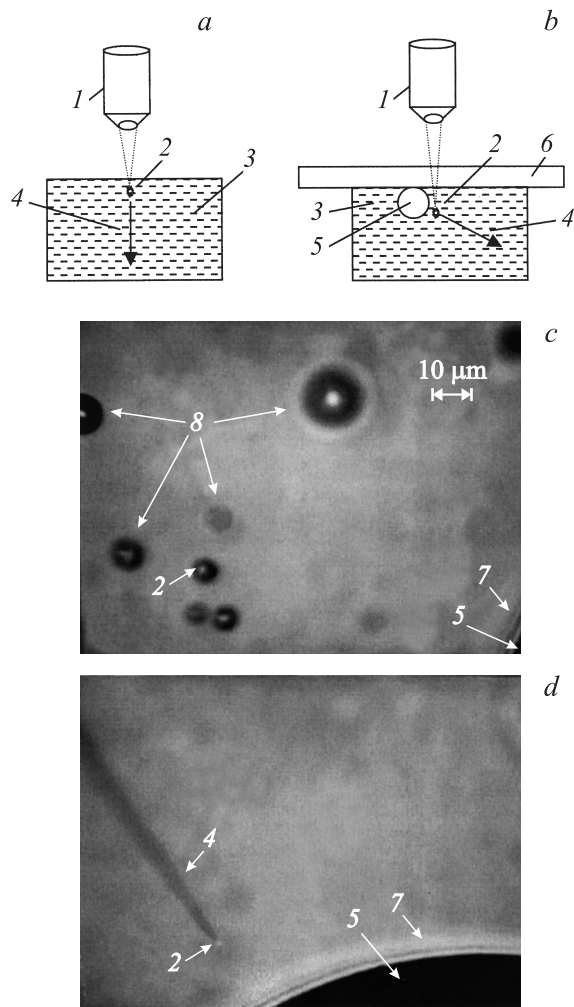
обеспечивала наблюдение как в процессе фокусировки луча в заданную точку вблизи границы раздела газ–жидкость, так и в процессе пробоя и формирования микропотоков жидкостно-пузырьковой фазы.

Лазерный пробой возбуждался вблизи плоской (рис. 2, *a*) или изогнутой (рис. 2, *b*) границы раздела газ–жидкость. Изогнутая поверхность создавалась с помощью газового пузырька, фиксированного в объеме жидкости на покровном стекле (рис. 2, *b*).

Эксперименты с изогнутой поверхностью проводились с дистиллированной водой, пробой вблизи плоской поверхности раздела исследовался в воде, в водных растворах NaCl и сахара, а также в тяжелой воде и в некоторых органических жидкостях — этиловом спирте, метиловом спирте, ацетоне, бутаноле и бензоле.

В результате экспериментов установлено, что формирование и разлет пузырьковой фазы вследствие объемного лазерного пробоя в жидкости происходят различным образом в зависимости от расстояния между зоной фокусировки лазерного пучка и поверхностью раздела жидкость–газ. В случае удаленности области фокусировки от границы раздела в результате пробоя жидкости наблюдаются нерегулярное во времени образование пузырьков газа и их разлет из зоны пробоя под различными углами. При приближении зоны лазерного пробоя к поверхности раздела происходит скачкообразный переход к режиму формирования слабо расходящейся струи, истекающей из зоны лазерного пробоя и направленной от границы раздела в жидкость вдоль нормали к поверхности раздела, проходящей через точку фокусировки лазерного луча. Сказанное выше иллюстрируется рис. 2, *c* и *d*, на которых представлены фотографии, полученные видеокамерой в эксперименте с дистиллированной водой. Геометрия эксперимента соответствует рис. 2, *b*. В этом эксперименте частота импульсов лазерного излучения составляла 107 кГц, а частота кадровой развертки видеокамеры — 20 Hz. Таким образом, фотографии показывают усредненную картину из большого числа ( $\sim 5000$ ) лазерных импульсов.

На рис. 2, *c* область фокусировки лазерного луча 2 отстоит на  $\sim 90 \mu\text{m}$  от поверхности раздела вода–газ 7, сформированной газовым пузырьком 5 радиусом  $\sim 100 \mu\text{m}$ , фиксированным на поверхности покровного стекла. Видно, что в этом случае образование и разлет пузырьков 8 имеет нерегулярный характер. Приближение зоны пробоя к границе раздела приводит к скачкообразному переходу от режима „нерегулярной“ генерации и разлета пузырьков к режиму формирова-

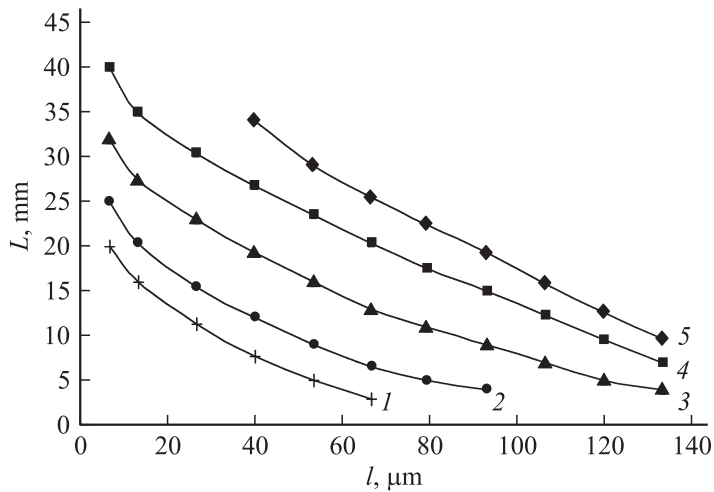


**Рис. 2.** Схемы проведения экспериментов (*a, b*) и фотографии лазерного пробоя в воде в режиме нерегулярного разлета пузырьков (*c*) и в режиме формирования струи (*d*): 1 — объектив, 2 — точка фокусировки, 3 — жидкость, 4 — струя, 5 — фиксированный пузырек, 6 — покровное стекло, 7 — поверхность раздела, 8 — пузырьки.

ния узкой слабо расходящейся жидкостно-пузырьковой струи, истекающей из зоны лазерного пробоя и направленной от границы раздела в жидкость (рис. 2, *d*). Диаметр пузырьков в месте истечения струи не превышает 2–3  $\mu\text{m}$ . Струя распространяется вдоль направления, задаваемого центром кривизны поверхности и точкой фокусировки лазерного луча. При перемещении области фокусировки относительно поверхности раздела направление распространения струи изменяется одновременно с направлением нормали к поверхности раздела, проходящей через точку фокусировки луча, а длина струи увеличивается при уменьшении расстояния до границы раздела. Насколько нам известно, формирование такой жидкостно-пузырьковой струи при лазерном пробое вблизи поверхности раздела жидкость–газ наблюдается впервые.

Аналогичные результаты были получены при инициировании лазерного пробоя вблизи изогнутой поверхности раздела вода–газ, создаваемой путем искривления свободной поверхности из-за поверхностного натяжения в каплях жидкости, а также при контакте свободной поверхности жидкости с твердой смачиваемой поверхностью. Таким образом, показана возможность бесконтактного формирования слабо расходящейся жидкостно-пузырьковой струи и управления ее длиной и направлением распространения.

Исследование зависимости длины струи от энергии лазерного импульса и от расстояния между точкой фокусировки луча и поверхностью раздела вода–воздух проводилось в эксперименте с плоской поверхностью раздела (рис. 2, *a*). Как видно из результатов, представленных на рис. 3, длина струи увеличивается с уменьшением расстояния до поверхности и с увеличением энергии импульса. С уменьшением энергии импульса до 170 нДж, близкой к порогу пробоя воды, составлявшего в наших экспериментах 110 нДж, область существования струи ограничивается интервалом расстояний от поверхности от 5 до 70  $\mu\text{m}$ . При дальнейшем удалении области фокусировки луча от поверхности раздела наблюдается переход к режиму нерегулярного образования и разлета пузырьков. В то же время при достаточно большой энергии импульса, существенно превышающей порог пробоя воды  $\sim 340$  нДж, формирование струи возможно только при удалении точки фокуса от поверхности на расстояние  $\sim 40$   $\mu\text{m}$  и более, что связано с нарушением целостности поверхности раздела в результате лазерного пробоя. Кроме того, увеличение энергии импульса приводит к возрастанию диаметра



**Рис. 3.** Зависимость длины жидкостно-пузырьковой струи  $L$  от расстояния  $l$  между точкой фокусировки лазерного луча и поверхностью раздела вода–воздух при различной энергии лазерного импульса. 1 —  $E = 170$  нДж, 2 —  $E = 200$  нДж, 3 —  $E = 270$  нДж, 4 —  $E = 320$  нДж, 5 —  $E = 340$  нДж.

струи и к появлению эффекта полиструйного истечения. В наших экспериментах наблюдалось одновременное истечение из области пробоя до 4 струй.

Интерпретация результатов экспериментов, с нашей точки зрения, заключается в следующем. В результате лазерного пробоя в фокальной области объектива образуется плазма, которая с течением времени термализуется с образованием кавитационного газового пузырька. Максимальный диаметр пузырька зависит от энергии лазерного импульса (в наших экспериментах диаметр пузырька составлял  $15 \mu\text{m}$  вблизи порога пробоя воды и увеличивался до  $80 \mu\text{m}$  при энергии импульса  $380$  нДж). В результате взаимодействия пузырька с поверхностью раздела в процессе кавитации формируется микропоток жидкости с включением пузырьков, направленный от поверхности раздела в жидкость [5,6]. Время схлопывания пузырька диаметром  $80 \mu\text{m}$ , рассчитанное по формуле Рэлея [6], составляет  $7.3 \mu\text{s}$ , что меньше периода следования лазерных импульсов в наших экспериментах —  $9.3 \mu\text{s}$ . Таким образом, до при-

хода следующего лазерного импульса пузырек, созданный предыдущим импульсом, успевает схлопнуться и сформировать микропоток жидкости, направление которого определяется положением фокальной точки объектива относительно поверхности раздела. С приходом каждого следующего лазерного импульса картина повторяется, однако, поскольку время затухания микропотока значительно превышает период следования лазерных импульсов, длина возникающей струи увеличивается. Ограничение длины стационарной струи связано с потерями энергии на преодоление сил вязкого трения.

В заключение отметим, что динамика формирования струи при лазерном пробое вблизи поверхности раздела жидкость–газ и сопутствующих явлений, таких как мультиструйное истечение, наблюдавшееся в наших экспериментах, требует дополнительных исследований с привлечением методов с высоким временным и пространственным разрешением.

## Список литературы

- [1] *Baghdassarian O., Chu H.-C., Tabbert B., Williams G.A.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 4934.
- [2] *Sarpe-Tudoran C., Assion A., Wollenhaupt W.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 2261109.
- [3] *Schaffer Ch.B., Nishimura N., Glezer E.* et al. // Opt. Express. 2002. V. 10. P. 196.
- [4] *Vogel A., Noack J., Hüttmann G., Paltauf G.* // Journ. of Phys. 2007. V. 59. P. 249.
- [5] *Brujan E.A., Nahen K., Schmidt P., Vogel A.* // Journ. of Fluid Mech. 2001. V. 433. P. 251.
- [6] *Lindau O., Lauterborn W.* // 2001. Sessions A5. 001. CAV2001.
- [7] *Brujan E.A., Keen G.S., Vogel A., Blake J.R.* // Phys. of Fluids. 2002. V. 14. P. 85.
- [8] *Jiang Y., Matsumoto Y., Hosokawa Y.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 061107.