

УДК 535.21, 532.5

ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА СУБМИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ПОГЛОЩАЮЩУЮ ЖИДКОСТЬ

В. И. Вовченко, С. М. Климентов, П. А. Пивоваров, А. А. Самохин

Приведены результаты измерений импульсов давления, возникающих в воде под действием субмиллисекундного лазерного излучения $Er^{3+}:YAG$ лазера на свободную и зажатую поверхности жидкости. Поведение импульсов давления обусловлено фотоакустическим эффектом, взрывным вскипанием перегретого приповерхностного слоя жидкости и кавитационными процессами, развивающимися после окончания лазерного воздействия.

Воздействие импульсного лазерного излучения на поглощающую жидкость сопровождается генерацией в ней импульсов давления, связанных с процессами, происходящими в зоне облучения (см., напр., [1–6] и цитируемую там литературу). В одномерном случае к их числу, в частности, относятся фотоакустический эффект, обусловленный тепловым расширением жидкости, поверхностное испарение и взрывное (объемное) вскипание, происходящее в перегретом приповерхностном слое жидкости. При достаточной интенсивности облучения эти процессы развиваются за время действия лазерного импульса, поскольку они непосредственно связаны с первоначальным нагревом жидкости излучением.

При переходе к не одномерному случаю, который реализуется при достаточно длительном воздействии и небольших пятнах облучения, возможен еще один механизм генерации импульсов давления, связанный с захлопыванием возникающих в этом случае кавитационных пузырьков [2]. В одномерном (или квазиодномерном) случае также возможно образование кавитационных полостей (пузырьков) при достижении границы метастабильности за счет перегрева или растяжения жидкости [6], однако, их захлопывание, вообще говоря, не происходит, а вместо этого происходит откол слоя жидкости.

В неоднородном случае образование кавитационного пузырька может быть связано с “распадом” возникшего за время действия излучения канала, когда облучаемая часть поверхности жидкости под действием испарительного давления и возникающего при этом радиального течения заметно углубляется по отношению к ее исходному уровню [2]. Подобный механизм отличается от формирования кавитационных полостей, которые возникают под действием острогофокусированного лазерного импульса в объеме слабопоглощающей жидкости после ее оптического пробоя [7, 8].

Очевидно, что формирование пузырьков за счет распада каверны реализуется при определенных соотношениях плотности энергии, длительности воздействия и размеров пятна лазерного излучения, которые необходимы для образования достаточно глубокой каверны. О подобном процессе упоминается, в частности, в работе [2] для случая воздействия импульса CO_2 лазера длительностью 400 мкс и с пятном облучения диаметром 50 мкм на воду, однако каких-либо данных о поведении давления не приводится. В настоящей работе, с использованием оптической и акустической диагностики, исследуется воздействие субмиллисекундного лазерного излучения $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ лазера на свободную и зажатую поверхности жидкости, при котором кроме отмеченных выше одномерных эффектов наблюдаются также импульсы давления с большой задержкой после окончания действия лазерного излучения, которые обусловлены захлопыванием кавитационного пузырька.

Общая схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ лазера, регистрируемое фотоприемником D125, фокусировалось в пятно диаметром 0.5 мм на поверхность воды в кювете. Для регистрации акустических возмущений, возникающих в результате лазерного воздействия, в дно кюветы был вмонтирован датчик на основе пленки пьезополимера ПВДФ или пьезоприемник на основе LiNbO_3 . Регистрируемый датчиком акустический сигнал начинался с задержкой относительно начала основного лазерного импульса, соответствующей времени прохождения звука по слою жидкости (27 мкс) и первая его часть заканчивалась вместе с лазерным импульсом. Регистрация гидродинамических (морфологических) возмущений облучаемой поверхности осуществлялась с помощью зондирующего излучения от полупроводникового лазера с длиной волны 0.88 мкм и диаметром луча 0.2 мм, импульс которого начинался за 10^{-4} с до начала действия основного лазерного импульса. Зондирующий луч проходил под поверхностью жидкости на изменяемой глубине (3–6 мм) и попадал на фотоприемник с апертурой 1 мм². Сигналы от фотоприемников и акустических датчиков регистрировались цифровым осциллографом GDS-810S с полосой пропускания

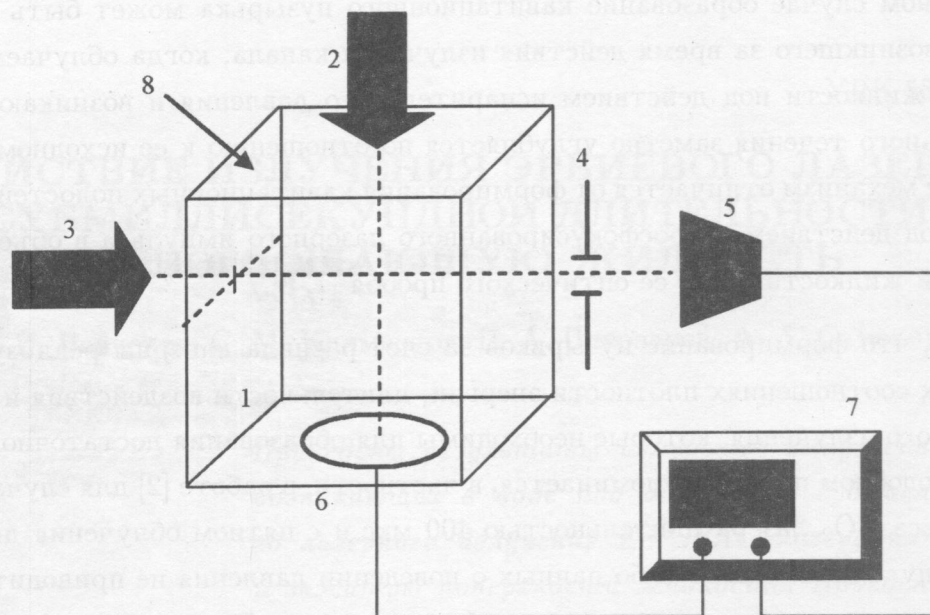


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – кювета размером $2.5 \times 3 \times 4$ см³ с дистиллированной водой, 2 – излучение эрбиевого лазера, 3 – излучение зондирующего лазера (длительность 1 мс, диаметр 0.2 мм), 4 – диафрагма, 5 – фотоприемник, 6 – акустический датчик на дне кюветы, 7 – осциллограф GDS-810S, 8 – уровень поверхности воды.

100 МГц и минимальной чувствительностью 2 мВ/дел. Основной лазерный импульс имел длительность от 100 до 200 мкс в зависимости от накачки и полную энергию до 50 мДж.

На рис. 2. показаны осциллограммы сигналов с фотоприемника зондирующего излучения (1) и пьезодатчика (2). Этот сигнал был обусловлен поверхностным испарением и, возможно, взрывным вскипанием приповерхностного перегретого слоя жидкости, толщина которого в данном случае не превышает 10^{-4} см в соответствии с коэффициентом поглощения воды 10^4 см⁻¹ на длине волны эрбиевого лазера. Как уже отмечалось выше, в одномерном случае эти процессы прекращаются вместе с лазерным импульсом. Однако акустический датчик спустя более чем 200 мкс регистрирует дополнительный импульс давления со значительно большей амплитудой, который при таких задержках весьма затруднительно связывать с процессом взрывного вскипания. Очевидным механизмом генерации такого дополнительного импульса представляется схлопывание кавитационного пузырька, возникающего в результате эволюции глубокой каверны, сформированной во время действия лазерного излучения. Осциллограммы сигналов

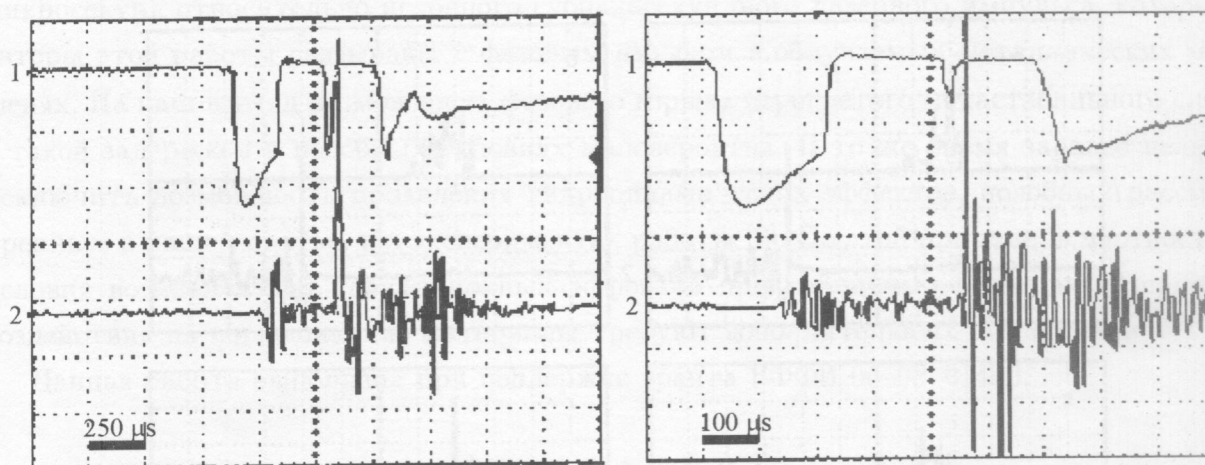


Рис. 2. Характерные осциллограммы сигналов с фотоприемника (1) и акустического датчика (2).

с фотоприемника, регистрирующего зондирующее излучение, согласуются с предполагаемой картиной процесса (рис. 2 кривая (1)). Зондирующий сигнал полностью перекрывается формирующейся каверной спустя примерно 100 мкс после начала действия лазерного импульса.

По этому времени и расстоянию зондирующего излучения от поверхности жидкости (4 мм) можно оценить скорость углубления каверны, которая составляет $4 \cdot 10^3$ см/с. Такая скорость может быть реализована при абляционном давлении на облучаемую поверхность $P \sim 16$ атм в соответствии с оценкой $P \sim \rho v^2$. Подобная величина абляционного давления согласуется со средней интенсивностью лазерного воздействия $2 \cdot 10^5$ Вт/см². Заметим, что при такой интенсивности скорость испарения оказывается в десятки раз меньше скорости углубления каверны, обусловленной неоднородными гидродинамическими эффектами.

Из рис. 2 видно также, что прохождение зондирующего излучения восстанавливается на короткое время (~ 30 мкс) непосредственно перед моментом возникновения кавитационного импульса давления, что свидетельствует о распаде первоначально сформированной каверны на отдельные части (пузырьки). Величина давления, возникающего при захлопывании этих пузырьков, оказывается значительно больше акустического возмущения, регистрируемого датчиком от облучаемой поверхности.

На рис. 3 показаны осциллограммы датчика давления (2) и основного лазерного импульса (1) при различных его энергиях, соответствующих разным уровням накачки.

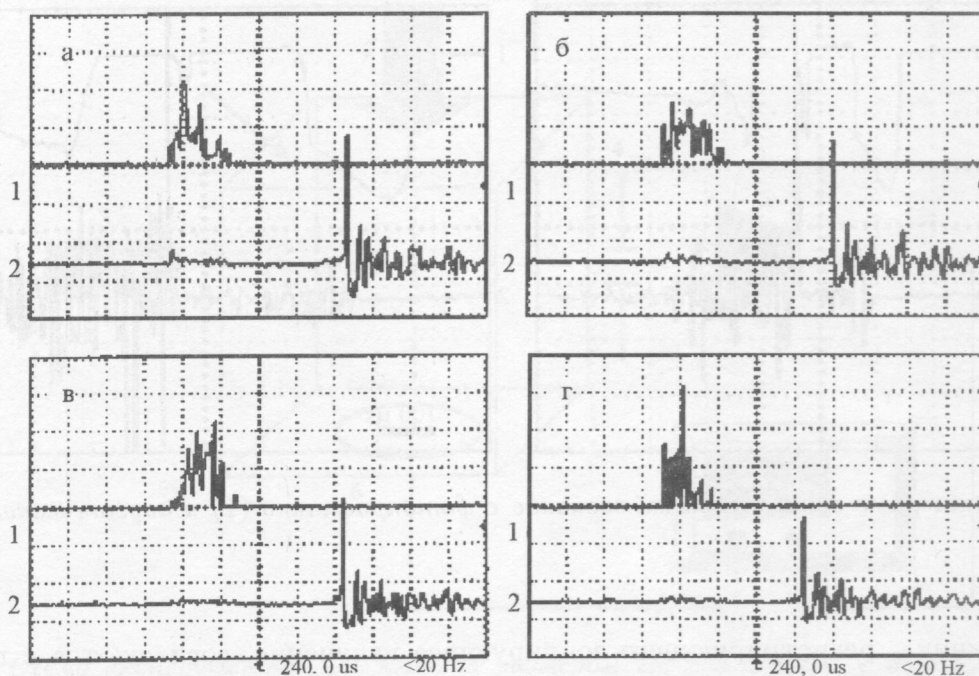


Рис. 3. Влияние уровня накачки лазера на момент захлопывания кавитационного пузырька: а – уровень накачки 1500 В, б – 1400 В, в – 1300 В, г – 1200 В.

Снижение напряжения накачки на 100 В приводит к уменьшению энергии примерно на 5 мДж. Из рис. 3 видно, что снижение энергии лазерного импульса не приводит к исчезновению импульса кавитационного давления, но уменьшает время задержки его появления относительно начала первого акустического импульса (от 460 мкс при максимальной накачке до 360 мкс при минимальной). Уменьшается также и задержка кавитационного импульса относительно окончания действия основного лазерного излучения (от 300 мкс при максимальной накачке до 240 мкс при минимальной). Различия в изменении интервала задержки в данном случае связано, в частности, с изменением длительности лазерного импульса, которая уменьшается с уменьшением накачки. Одна из причин уменьшения задержки с уменьшением энергии лазерного импульса может быть связана с уменьшением первоначального размера и времени захлопывания образующегося кавитационного пузырька.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность возникновения дополнительных импульсов давления в облучаемой мишени со значительной задержкой после окончания действия лазерного излучения. В этой связи стоит отметить недавнюю работу [9], где наблюдался сильный эффект последствия с задержкой в десятки

микросекунд относительно исходного субнаносекундного лазерного импульса, который авторы этой работы связывают с фазовым взрывом в облучаемых металлических мишенях. На наш взгляд возможность фазового взрыва перегретого метастабильного слоя с такой задержкой в подобных условиях маловероятна. В то же время заранее нельзя исключить возможность проявления гидродинамических эффектов, подобных рассмотренным в нашей статье, и в экспериментах работы [9]. По этой причине, в частности, условия возникновения кавитационных эффектов при различных режимах лазерного воздействия на поглощающие материалы требуют дополнительных исследований.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-01440.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. А. Самохин, Труды ИОФАН **13**, 3 (1988).
- [2] D. Kim, M. Ye, and C. P. Grigoropoulos, Applied Surface Science **127-129**, 53 (1998).
- [3] D. Kim and C. P. Grigoropoulos, Applied Physics A: Materials Science & Processing **67**, 169 (1998).
- [4] Y. Kawaguchi, X. Ding, A. Narazaki, et al., Applied Physics A: Materials Science & Processing **80**, 275 (2005).
- [5] Г. В. Островская, Журнал технической физики **72**(10), (2002).
- [6] L. V. Zhigilei and B. J. Garrison, Journal of Applied Physics **88**, 1281 (2000).
- [7] В. С. Тесленко, ПМТФ N 4, 109 (1976).
- [8] T. Asshauer, K. Rink, and G. Delacretaz, Journal of Applied Physics **76**, 5007 (1994).
- [9] A. V. Pakhomov, M. S. Thompson, and D. A. Gregory, Journal of Physics D: Applied Physics **36**, 2067 (2003).

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 27 июля 2007 г.