

УДК 534.8; 535.15; 536.4

ФОТОАКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НАГРУЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ЛАЗЕРНЫЙ ИМПУЛЬС С МОДУЛИРОВАННОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

Н. Н. Ильичев, А. А. Самохин

Излагаются результаты экспериментов по воздействию импульса эрбиевого лазера (длительность 300 – 400 нс, длина волны 2.94 мкм) на поверхность воды, нагруженной прозрачной пластинкой из сапфира толщиной 9.6 мм. Интенсивность лазерного импульса модулировалась с периодом 8.2 нс. Поведение фазы модулированной части фотоакустического отклика в условиях данного эксперимента существенно отличается от случая облучения свободной поверхности жидкости [1, 2].

Ключевые слова: действие лазерного излучения, фотоакустический эффект, эффект Доплера.

В работах [1, 2] сообщалось о первых результатах экспериментальных исследований особенностей поведения фазы фотоакустического сигнала, генерируемого в поглощающей жидкости (вода, этанол) при воздействии на ее свободную поверхность лазерного импульса (длительность 200 нс, длина волны 2.94 мкм) с модулированной за счет модовых биений интенсивностью с периодом модуляции 8.2 нс. Изменение этой фазы, т.е. сжатие или растяжение модуляционной составляющей акустического сигнала за счет эффекта Доплера относительно ее невозмущенной структуры (или модуляции лазерной интенсивности), позволяет судить о движении облучаемой поверхности во время действия лазерного импульса в случае, если изменение геометрии зоны поглощения излучения при этом является достаточно малым. Насколько нам известно, подобные исследования при регистрации фотоакустических сигналов в поглощающих средах со

Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ilichev@kapella.gpi.ru, asam40@mail.ru.

свободной или нагруженной поверхностью облучения ранее не проводились (см., напр., литературу, цитированную в [1–3]).

В настоящей работе излагаются предварительные результаты экспериментов по исследованию поведения фазы фотоакустического сигнала в том случае, когда облучаемая поверхность поглощающей жидкости находится в контакте с прозрачной пластинкой, препятствующей ее свободному перемещению. Для сравнения также приведены результаты экспериментов с облучением свободной поверхности жидкости.

Общая схема эксперимента аналогична описанной в [1–3], с тем отличием, что поверхность облучаемой жидкости закрывалась прозрачной для лазерного излучения пластинкой из сапфира толщиной 9.6 мм. Длительность лазерного импульса на полувысоте составляла 300–400 нс. Толщина слоя жидкости была около 1.5 мм, поэтому влияние отраженных от границ слоя акустических сигналов за время действия лазерного импульса не сказывается.

На рис. 1(b), 2(b) показаны фотоакустические отклики (кривые 2) в воде при облучении ее свободной поверхности лазерными импульсами с модулированной интенсивностью (рис. 1(a), 2(a)). Медленные и быстрые (модуляционные) составляющие акустического сигнала показаны, соответственно, кривыми 3 на рис. 1(b), (c), рис. 2(b), (c) и кривыми 2' на рис. 1(c), рис. 2(c).

Кривые 1 на рис. 1(b) и 2(b) демонстрируют сжатие (или растяжение) во времени модуляционной компоненты акустического сигнала $t_f(t)$ относительно его периода в начале сигнала или относительно периода модуляции лазерной интенсивности [1, 2]. Выражение для этой временной задержки $t_f(n) = t_n - n\Delta t$ определяется как разность между положением n -го нуля t_n модуляционной составляющей сигнала на оси времени и его опорным (реперным) положением $n\Delta t$ с фиксированным полупериодом Δt , относящимся к начальной части импульса или к модуляции лазерной интенсивности. Функция $t_f(n)$ определена во времени на дискретном множестве точек $n\Delta t$, но для наглядности она представляется непрерывной по времени кривой $t_f(t)$, построенной по этим точкам. Если период модуляции акустического сигнала остается постоянным, то временная задержка $t_f(t) = 0$. Для модуляционной составляющей интенсивности лазерного импульса также $t_f(t) = 0$. Экспериментально это изменение оказывается меньше 0.2 нс за все время лазерного импульса, что близко к точности измерений.

Отрицательные (положительные) значения кривой 1 для акустического сигнала соответствуют сжатию (растяжению) акустической модуляционной компоненты, т.е. приближению (удалению) акустического источника к регистрирующему датчику.

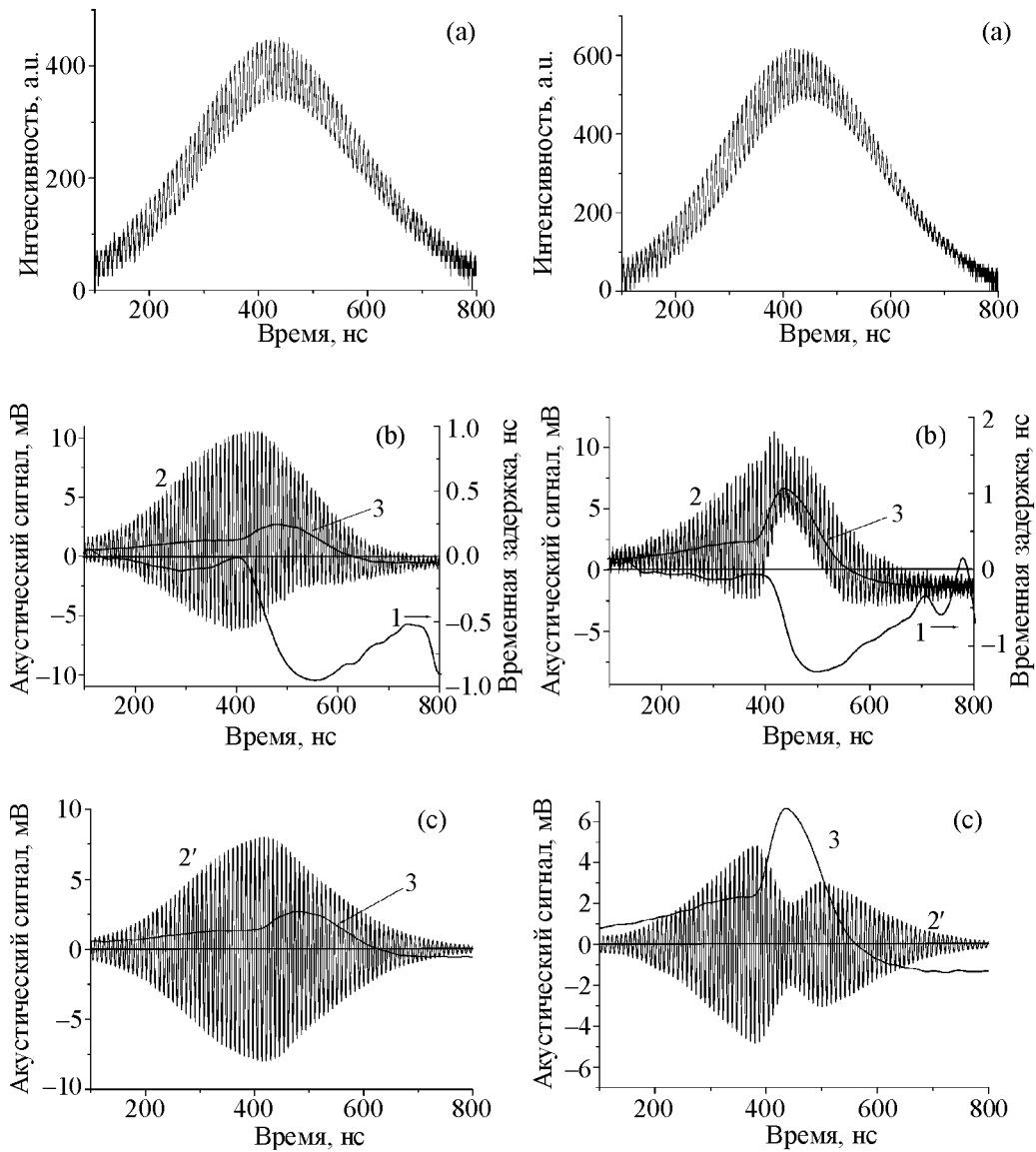


Рис. 1: Лазерный импульс (а), акустическая временная задержка $t_f(t)$ ((b), кривая 1), полный акустический сигнал ((b), кривая 2), его модуляционная ((c), кривая 2') и плавная ((b), (c), кривая 3) составляющие. Свободная поверхность облучения.

Рис. 2: Лазерный импульс (а), акустическая временная задержка $t_f(t)$ ((b), кривая 1), полный акустический сигнал ((b), кривая 2), его модуляционная ((c), кривая 2') и плавная ((b), (c), кривая 3) составляющие. Свободная поверхность облучения. Плотность энергии облучения увеличена в 1.5 раза по сравнению с рис. 1.

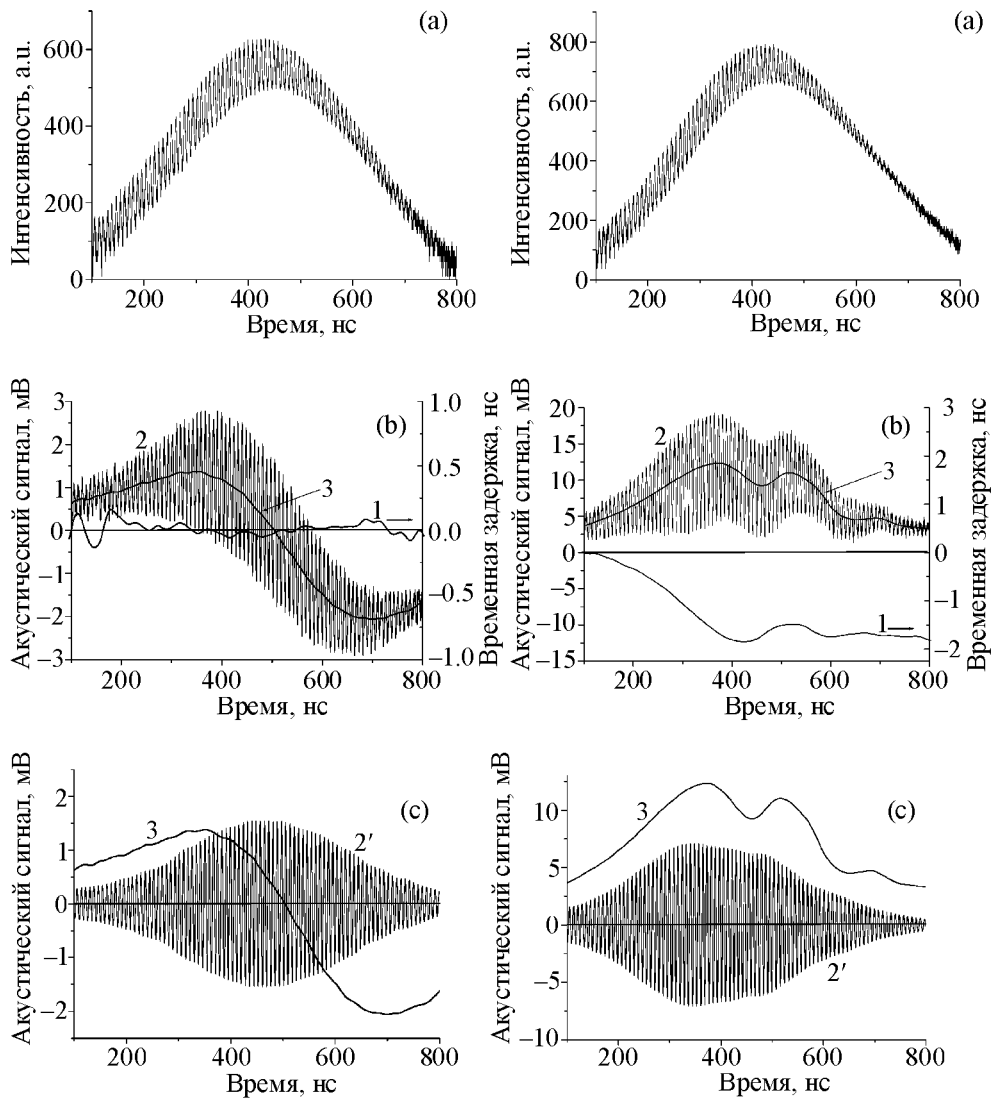


Рис. 3: Лазерный импульс (а), акустическая временная задержка $t_f(t)$ (b, кривая 1), полный акустический сигнал ((b), кривая 2), его модуляционная ((c), кривая 2') и плавная ((b), (c), кривая 3) составляющие. Поверхность воды закрыта сапфировой пластиной.

Рис. 4: Лазерный импульс (а), акустическая временная задержка $t_f(t)$ (b, кривая 1), полный акустический сигнал ((b), кривая 2), его модуляционная ((c), кривая 2') и плавная ((b), (c), кривая 3) составляющие. Поверхность воды закрыта сапфировой пластиной. Плотность энергии облучения увеличена почти на порядок по сравнению с рис. 3.

Сближение акустического источника с датчиком, демонстрируемое кривыми 1 (рис. 1(b) и рис. 2(b)), может быть связано с процессом испарения и ростом усредненного давления на облучаемой поверхности (кривые 3), которое начинает заметно увеличиваться практически одновременно с формированием провала на кривых 1. Отличие в поведении амплитуды модуляционной составляющей акустических сигналов (кривые 2' на рис. 1(c) и рис. 2(c)), связано, по-видимому, с деструктивной интерференцией термоакустического и испарительного механизма при формировании модуляционного отклика, которая с ростом испарительного давления приводит к уменьшению амплитуды модуляционного сигнала. Об этих особенностях поведения фотоакустического отклика при воздействии лазерного импульса с модулированной интенсивностью на свободную поверхность поглощающей жидкости уже сообщалось в работах [1–3].

Поведение акустических сигналов при облучении поверхности поглощающей жидкости, закрытой прозрачной пластинкой из сапфира толщиной 9.6 мм, показано на рис. 3, 4. Формы кривых 3 на этих рисунках, описывающих эволюцию медленной составляющей акустических сигналов, отличаются от плавной составляющей лазерного импульса, что может быть связано, в частности, с эффектами акустической дифракции, о чем уже упоминалось ранее для случая свободной поверхности облучаемой жидкости [3].

Изменение во времени фазы модулированной части фотоакустического сигнала $t_f(t)$ в случае закрытой поверхности носит качественно иной характер по сравнению с открытой поверхностью в том же примерно 0.1–0.7 Дж/см² диапазоне плотностей лазерного облучения. При малых плотностях энергии величина $t_f(t)$ (кривая 1 на рис. 3(b)) практически не изменяется за все время действия лазерного импульса (рис. 3(c)).

Постоянство величины $t_f(t)$ в данном случае может быть интерпретировано как отсутствие изменений в положении и размере зоны поглощения лазерного излучения, которая одновременно является областью генерации акустического сигнала. Такое поведение естественно для закрытой поверхности жидкости, которая не может смещаться навстречу лазерному излучению, т.е. отдаляться от акустического датчика. Возможность взаимной компенсации эффектов от изменений положения облучаемой поверхности и размеров зоны акустической генерации в данном случае представляется маловероятной, но исчерпывающий ответ на этот вопрос требует дальнейших исследований.

На рис. 4(b) показан один из вариантов поведения $t_f(t)$ (кривая 1) при увеличенной почти на порядок по сравнению с рис. 3 плотности энергии за счет уменьшения размеров пятна облучения. Значительное уменьшение $t_f(t)$ может быть обусловлено как смещением облучаемой поверхности навстречу акустическому датчику, так и увели-

чением зоны акустической генерации за счет уменьшения коэффициента поглощения лазерного излучения. Характерный пространственный размер этих изменений определяется произведением $vt_f(t)$, где $v = 1.5$ км/с обозначает скорость звука в воде, и может достигать нескольких микрометров. В некоторых случаях наблюдалось возрастание величины $t_f(t)$, т.е. смещение эффективной области акустической генерации в противоположном от датчика направлении, что может свидетельствовать, в частности, об увеличении коэффициента поглощения лазерного излучения.

Таким образом, применение предложенного в [1, 2] метода акустической диагностики лазерного воздействия на поглощающие среды демонстрирует существенное отличие поведения модулированной части акустического отклика в случае закрытой поверхности облучения по сравнению с облучением свободной поверхности. Кроме очевидной причины, связанной с ограничением разлета паров и смещения облучаемой поверхности навстречу лазерному излучению, это отличие может быть также связано с достижением иной, по сравнению с облучением свободной поверхности, области термодинамических параметров при том же лазерном воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ гранты №№ 09-02-00545а, 09-02-01055а и 10-02-00770а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. А. Самохин, Н. Н. Ильичев, Квантовая электроника **40**, 659 (2010).
- [2] А. А. Samokhin, N. N. Il'ichev, S.M. Klimentov, and P. A. Pivovarov, Appl. Phys. B (2011) to be published.
- [3] А. А. Samokhin, V. I. Vovchenko, and N. N. Il'ichev, Phys. Wave Phenomena **16**, 275 (2008).

Поступила в редакцию 6 июля 2011 г.