

УДК 534; 535.3; 536; 535.39

ЛАЗЕРНОЕ ИСПАРЕНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПОД ПРОЗРАЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

А. А. Самохин¹, Н. Н. Ильичев¹, П. А. Пивоваров^{1,2}, А. В. Сидорин¹

Исследуется испарение поглощающей жидкости (воды) под прозрачным твердым покрытием под действием наносекундных импульсов от гольмиевого лазера ($\lambda = 2920$ нм) с использованием акустической и оптической диагностики. Особенности оптического сигнала, отраженного от границы раздела жидкость–покрытие, позволяют предположить, что паровая полость возникает на субмикронном удалении от этой границы и существует порядка сотни микросекунд. Дополнительный акустический сигнал, возникающий после возвращения светового сигнала на исходный уровень, обусловлен известными кавитационными эффектами, сопровождающими разрушение и схлопывание паровой полости в жидкости.

Ключевые слова: действие лазерного излучения, фотоакустический эффект, полное внутреннее отражение.

Действие лазерных импульсов с достаточно большой интенсивностью и плотностью энергии на поглощающие конденсированные среды сопровождается, в частности, фазовым переходом жидкость–пар. Проявления этого перехода, как и всякого неравновесного процесса, существенно зависят от условий его реализации. В работах [1–4] была продемонстрирована трансформация фотоакустического сигнала (ФАС) под действием испарительного процесса, который развивается при увеличении интенсивности облучения свободной поверхности поглощающего материала.

Использование наносекундных импульсов излучения с гармонической модуляцией интенсивности от эрбиевого лазера для облучения воды, которая является сильно поглощающей жидкостью на этой длине волны (2940 нм), позволило обнаружить эффект

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: asam40@mail.ru.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

компенсации вкладов от термического и испарительного механизмов генерации ФАС в его модулированной части [5], а также дало возможность регистрировать смещение облучаемой поверхности непосредственно во время действия лазерного импульса [6–8].

Наличие прозрачной твердой преграды на облучаемой поверхности поглощающей жидкости качественно меняет поведение ФАС, в том числе, и при увеличении интенсивности облучения, о чем уже сообщалось ранее [7, 8]. Такое изменение может быть связано с уменьшением коэффициента поглощения или просто с возникновением полости в облучаемой жидкости, однако вопросы о ее локализации и поведении после окончания лазерного импульса оставались открытыми.

В настоящей работе экспериментальные исследования [7, 8] продолжены с использованием не только акустической, но и оптической диагностики процессов, протекающих в облучаемой жидкости с закрытой поверхностью как во время, так и после окончания действия лазерного импульса.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение импульсного гольмиевого лазера (1) ($\lambda = 2920$ нм, $\tau = 150$ нс) направлялось на поверхность жидкости (2), облучаемая поверхность которой была закрыта равнобедренной усеченной призмой (П) из флюорита (3). Снизу слой воды толщиной 2.6 мм контактировал с поверхностью пьезодатчика (4) из ниобата лития, подобного тому, который ранее использовался, в частности, в работах [5–8]. Интенсивность оптического излучения от источника (5), отраженного на границе призма–жидкость регистрировалась с временным разрешением 10 нс фотоприемником (6), сигнал с которого, как и сигнал с пьезодатчика, подавался на осциллограф (7). В данной геометрии условия полного внутреннего отражения (ПВО) могли реализовываться только при отсутствии контакта нижней границы призмы с жидкой фазой, т.е. в начальном состоянии, до воздействия импульсного инфракрасного излучения, ПВО отсутствовало.

Линейный фотоакустический отклик поглощающей жидкости со свободной поверхностью имеет биполярную форму, которая при не слишком больших коэффициентах поглощения совпадает с производной от интенсивности лазерного импульса. Возникновение испарения приводит к появлению дополнительного монополярного пика давления в области нуля первоначального фотоакустического отклика, обусловленного термическим расширением [1–5]. С увеличением интенсивности испарительный пик растет значительно быстрее, чем термическая составляющая ФАС, в результате чего форма сигнала становится монополярной.

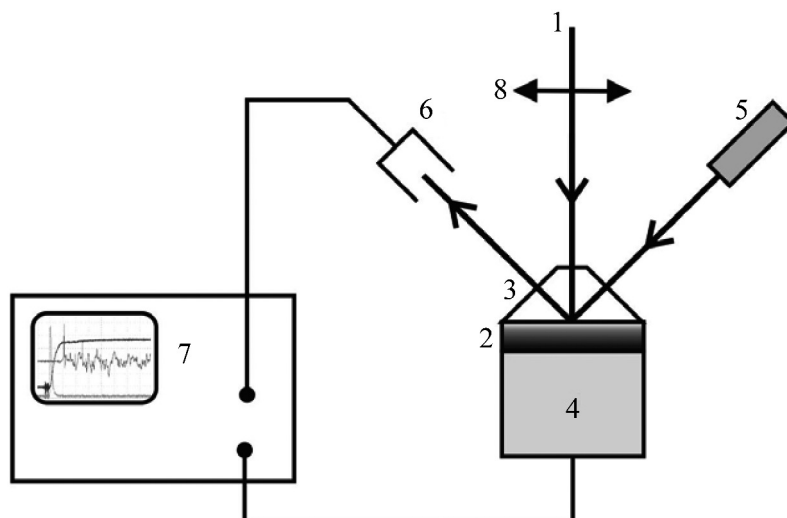


Рис. 1: Схема эксперимента. 1 – лазерное излучение импульсного гольмиевого лазера, 2 – слой жидкости толщиной 1–2 мм, 3 – усеченная призма, 4 – пьезодатчик, 5 – непрерывный лазер ($\lambda = 530$ нм), 6 – фотоприемник, 7 – осциллограф, 8 – фокусирующая линза.

В случае зажатой поверхности линейный ФАС, обусловленный термическим эффектом (тепловым расширением), в отличие от свободной поверхности, имеет монополярный вид, повторяющий форму огибающей интенсивности лазерного импульса (см., напр., [9]). С ростом интенсивности, вместо ожидаемого на первый взгляд сохранения монополярности, появляется биполярный ФАС, характерный для случая свободной облучаемой поверхности. При дальнейшем увеличении интенсивности ФАС снова становится монополярным [7, 8].

Обретение монополярности при больших интенсивностях не кажется удивительным, в отличие от случая появления биполярной формы ФАС при промежуточных интенсивностях. Одним из возможных естественных объяснений этой биполярности является формирование полости в зоне прогрева облучаемой жидкости. Возникновение такой полости не противоречит результатам акустической диагностики, регистрирующей микронные смещения области поглощения в глубину жидкости во время действия лазерного излучения [6, 7]. Здесь необходимо отметить, что такое объяснение оставляет открытым вопрос о возможности значительного изменения коэффициента поглощения, при сравнительно небольших изменениях плотности жидкости. Этот вопрос в известном смысле аналогичен проблеме “просветления” металлов в околоскритической области

параметров состояния и требует отдельного рассмотрения [4].

Дополнительная информация о первоначальной локализации полости и ее поведении после окончания лазерного импульса содержится в полученных в настоящей работе и представленных на рис. 2 результатах оптического зондирования.

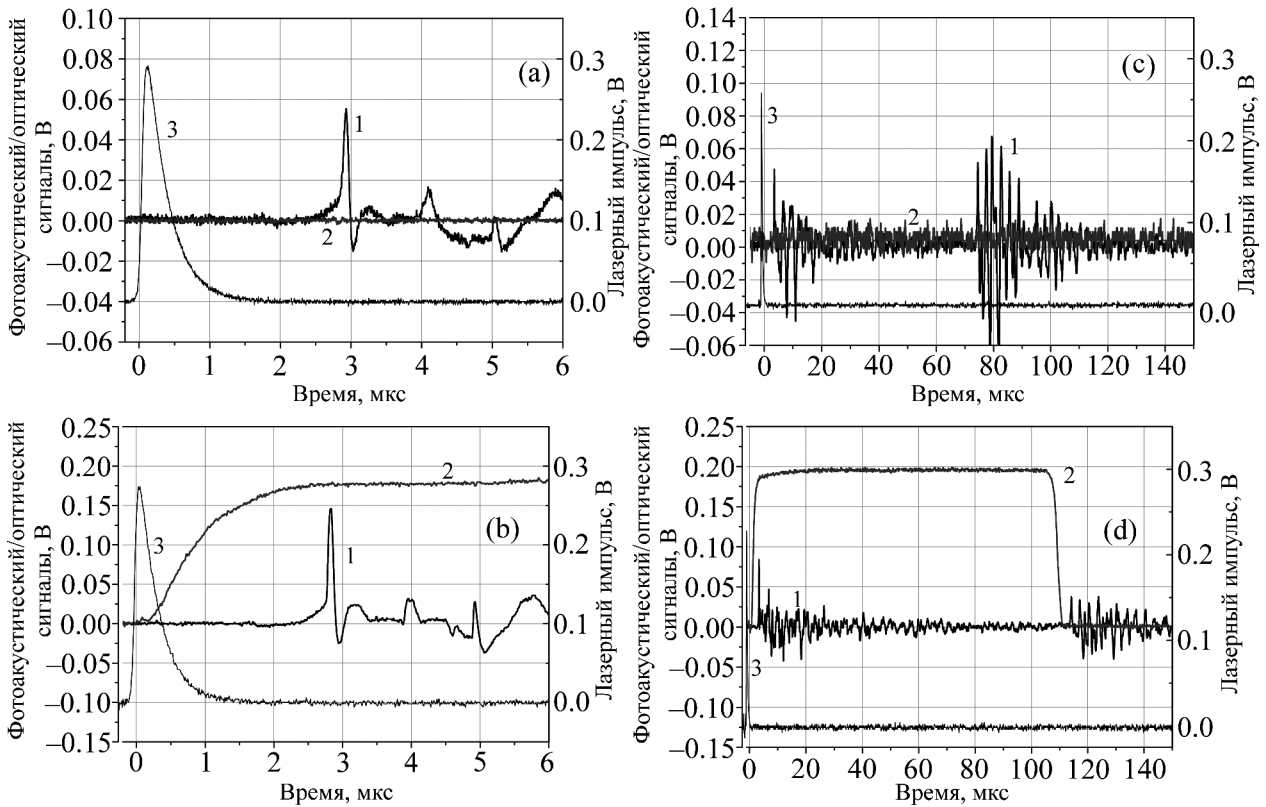


Рис. 2: Сигналы с акустического (1) и оптических датчиков зондирующего (2) и импульсного лазерного (3) излучения при плотностях энергий последнего: 0.1 Дж/см² ((a), (c)) и 0.5 Дж/см² ((b), (d)).

На рис. 2((a), (b)) показано поведение акустического (1) и оптического (2) сигналов (АС и ОС) для малых времен, сравнимых с длительностью лазерного импульса (3), а на рис. 2((c), (d)) – для более протяженных интервалов времени. При малых интенсивностях и малых временах наблюдается только акустический сигнал, генерируемый непосредственно во время действия лазера, причем монополярная форма этого сигнала при увеличении интенсивности становится биполярной еще до появления заметного оптического отклика (рис. 2(a)).

Из рис. 2(b) видно, что нарастание ОС происходит сравнительно медленно, достигая своего максимума уже значительно позже окончания греющего лазерного импульса

и оставаясь малым во время его действия. Максимум ОС приближается к значению, возникающему при полном внутреннем отражении от “сухой” поверхности призмы П. Возвращение ОС к исходному уровню, соответствующему отсутствию полного внутреннего отражения на границе пластины с жидкостью, сопровождается появлением еще одного акустического сигнала с задержкой в несколько микросекунд после окончания ОС. Повторный АС наблюдается также при малых интенсивностях облучения, когда никаких заметных изменений исходного ОС не происходит (рис. 2(с)). С увеличением интенсивности момент возникновения повторного АС сдвигается на более поздние времена. Длительность наблюдаемого ОС с ростом интенсивности также увеличивается.

Описанное выше поведение ОС может быть качественно объяснено следующим образом. Возникновение полости в облучаемой области жидкости приводит к трансформации ФАС от монополярного к биполярному виду и к изменению граничных условий оптического отражения от нижней поверхности П, первоначально контактирующей с жидкостью. Однако регистрируемое изменение ОС происходит постепенно за время порядка нескольких микросекунд, что не согласуется с простейшим предположением о возникновении и росте плоскопараллельной паровой полости в жидкости непосредственно на границе П уже во время действия лазерного импульса, поскольку при регистрируемом микронном смещении области поглощения лазерного излучения [6–8] величина ОС в этом случае уже должна соответствовать режиму полного внутреннего отражения, если плотность образовавшегося пара мала по сравнению с исходной плотностью жидкости.

Первоначальное отличие ОС от его максимального значения может быть связано с наличием субмикронной пленки жидкости на нижней поверхности П при формировании полости под этой поверхностью. Толщина этой пленки определяется характерной длиной теплового (охлаждающего) влияния П на зону лазерного прогрева жидкости. Охлаждающее влияние П приводит к смещению максимума температурного профиля в глубину жидкости, где и начинается формирование паровой полости при достижении температуры предельного перегрева. Обе поверхности полости при этом сначала не являются идеально плоскими из-за возмущений, возникающих при их формировании в результате фазового перехода жидкость–пар.

Наращение ОС до его максимального значения после лазерного импульса обусловлено, скорее всего, не последующим уменьшением толщины жидкой пленки, прилегающей к П, а планаризацией ее нижней поверхности даже при возможном росте этой толщины из-за процесса конденсации. В рассматриваемой геометрии ПВО может реализовывать-

ся не только на сухой поверхности П, но и в том случае, когда к этой поверхности прилежит тонкий плоский слой жидкости со свободной нижней поверхностью. При таком объяснении время нарастания ОС определяется временем планаризации внешней границы этого прилегающего к П слоя жидкости, т.е. верхней границы возникшей полости. Поведение нижней границы полости при этом слабо влияет на форму наблюдаемого ОС, поскольку зондирующий световой сигнал не достигает этой поверхности из-за ПВО.

Уменьшение и возвращение ОС на исходный (невозмущенный) уровень в рассматриваемой интерпретации связано с закрытием полости, которое из-за пространственной неоднородности этого процесса имеет определенную длительность, превышающую десятки микросекунд. В ходе этого процесса полость с большой вероятностью утрачивает уровень своей односвязности, разбиваясь на совокупность отдельных более мелких пузырьков, последующее схлопывание которых рождает дополнительные акустические возмущения. Увеличение общей длительности ОС с увеличением интенсивности может быть связано с ростом генерируемых при этом пространственно-временных возмущений.

Второй акустический сигнал появляется при увеличении интенсивности и наблюдается в некотором интервале интенсивностей еще при отсутствии светового сигнала. При наличии ОС видно, что второй акустический сигнал возникает после окончания ОС, что может быть связано с упомянутым выше захлопыванием полости и возникающими при этом кавитационными явлениями, которыми обычно сопровождаются процессы интенсивного импульсного облучения поглощающих жидкостей (см., напр., [10] и цитированную там литературу).

Таким образом, использование дополнительной (по сравнению с акустической) оптической диагностики, основанной на изменении светового сигнала в области его возможного полного внутреннего отражения от прилегающей к жидкости поверхности П, позволяет получить новую информацию о возникающей при действии лазерного облучения полости в поглощающей жидкости. Из полученных результатов следует, в частности, что нижняя поверхность П не является непосредственной верхней границей паровой полости, от которой ее отделяет первоначально субмикронный слой жидкой фазы. Время существования полости, определяемое по длительности ОС, превышает сотню микросекунд, а ее захлопывание сопровождается известными кавитационными эффектами, порождающими дополнительные акустические возмущения. Поведение тонкого жидкого слоя, отделяющего полость от нижней поверхности П, может быть исследовано далее в рамках другой оптической схемы, детектирующей модуляцию отраженного сигнала,

обусловленную интерференционными эффектами при изменении толщины этого слоя. Результаты подобного исследования будут опубликованы отдельно.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 13-02-01129.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. V. Sigrist and F. K. Kneubuhl, *JASA* **64**, 1652 (1978).
- [2] А. И. Коротченко, А. А. Самохин, А. В. Сидорин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 3, 35 (1979).
- [3] И. А. Веселовский, Б. М. Жиряков, А. И. Коротченко, А. А. Самохин, *Квантовая электроника* **12**(2), 381 (1985).
- [4] А. А. Самохин, *Труды ИОФ РАН* **13**, 3 (1988).
- [5] A. A. Samokhin and N. N. P'ichev, in *"Phase Transitions Induced by Short Laser Pulses"*. Editor: Georgy A. Shafeev (Nova Science Publishers, Inc., NY, 2009), p. 135.
- [6] А. А. Самохин, Н. Н. Ильичев, *Квантовая электроника* **40**(8), 659 (2010).
- [7] A. A. Samokhin, N. N. P'ichev, P. A. Pivovarov, A. V. Sidorin, *Mathematica Montisnigri* **30**, 46 (2014).
- [8] Н. Н. Ильичев, А. А. Самохин, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **38**(11), 49 (2011).
- [9] С. Н. Андреев, С. В. Орлов, А. А. Самохин, *Труды ИОФАН* **60**, 127 (2004).
- [10] В. И. Вовченко, С. М. Климентов, П. А. Пивоваров, А. А. Самохин, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **34**(11), 14 (2007).

Поступила в редакцию 17 марта 2015 г.