

# Пропускание лазерного излучения поглощающими жидкостями

С.И.Долгаев, А.В.Симакин, Г.А.Шафеев

*Экспериментально исследовано пропускание излучения ИАГ: Er<sup>3+</sup>-лазера ( $\lambda = 2.94$  мкм) в режиме свободной генерации сильнопоглощающими жидкостями. Показано, что прохождение излучения сквозь жидкость обусловлено развитием в ней канала, формируемого самим лазерным импульсом. Исследовано пропускание воды, этанола и глицерина в зависимости от энергии лазерного импульса и толщины жидкостей.*

**Ключевые слова:** распространение излучения, самовоздействие излучения, вода, эрбиевый лазер.

## 1. Введение

В работе [1] был впервые обнаружен эффект просветления оптически плотных жидкостей (H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) при воздействии на них импульсного лазерного излучения ИК диапазона (ИАГ: Er<sup>3+</sup>-лазер,  $\lambda = 2.94$  мкм). Коэффициент поглощения  $\alpha$  гидроксилсодержащих жидкостей, к которым относятся вода и этанол, на длине волны лазерного излучения достигает  $10^4$  см<sup>-1</sup> и определяется концентрацией водородных связей в среде. Несмотря на то что излучение должно практически полностью поглотиться в слое толщиной менее 1 мкм ( $\alpha^{-1}$ ), экспериментально наблюдается прозрачность слоёв жидкости толщиной до 100 мкм [1–3]. В качестве возможных механизмов просветления рассматривались следующие [1]: 1) насыщение поглощения квантовой двухуровневой системы под действием интенсивного лазерного излучения; 2) изменение плотности среды при её лазерном испарении; 3) сдвиг спектра поглощения при нагреве воды до высоких температур, обусловленный разрывом водородных связей. Однако ни одна из предложенных версий не получила экспериментального подтверждения, и вопрос о механизме прохождения интенсивного лазерного излучения через поглощающие жидкости остаётся до настоящего времени открытым.

Прохождение лазерного ИК излучения сквозь тонкие слои воды экспериментально исследовалось в [3, 4]. Следует отметить, что в обеих работах высказывалось предположение о возникновении под действием лазерного импульса канала, по которому излучение распространяется в поглощающей среде. Однако прямого наблюдения каналов, возникновение которых сопровождает распространение импульса в жидкости, произведено не было. При этом подразумевалось, что образование каналов происходит только за счёт испарения жидкости при поглощении энергии лазерного импульса.

В то же время образование каналов (длина которых намного превышает глубину поглощения излучения) при воздействии интенсивного лазерного излучения на по-

глощающие среды является известным экспериментальным фактом. Например, в [5] наблюдалось формирование канала в глицерине при его облучении непрерывным СО<sub>2</sub>-лазером. Вопрос о пороговых условиях образования канала в расплаве (например, при лазерной резке металлов) под действием давления паров отдачи испаряемого материала на границу раздела жидкость – пар (так называемое кинжальное проплавление) подробно рассмотрен в обзоре [6].

Динамика взаимодействия интенсивного лазерного излучения с поглощающими жидкостями при лазерной абляции исследовалась во многих работах [7–9], в том числе с точки зрения глубины проникновения лазерного излучения в жидкость [10]. Динамика развития каналов в воде и желатине под действием импульсного излучения эрбиевого лазера, работающего в режиме свободной генерации, изучалась в [11]. В этой работе были экспериментально и теоретически исследованы скорости формирования каналов, достигающие десятков метров в секунду. Однако до настоящего времени вопрос о механизме просветления жидкостей под действием лазерного излучения не связывался с формированием в ней каналов и с этой точки зрения экспериментально не исследовался.

В настоящей работе на примере воздействия на поглощающие жидкости излучения эрбиевого лазера впервые экспериментально показано, что излучение может проходить через оптически плотные слои жидкости вследствие образования в ней сквозного канала. Экспериментально исследовано пропускание воды в зависимости от энергии лазерного импульса и толщины жидкости, и проведено его сравнение с пропусканием других жидкостей (этанол, глицерин). Динамика взаимодействия пучка с жидкостями исследована с помощью видеосъемки.

## 2. Техника эксперимента

В экспериментах применялось импульсное излучение ИАГ: Er<sup>3+</sup>-лазера, работающего в режиме свободной генерации ( $\lambda = 2.94$  мкм, энергия в импульсе 0.5 Дж, длительность импульса по полувысоте 150 мкс). Излучение фокусировалось флюоритовой линзой в пятно диамет-

ром около 200 мкм (по уровню 1/e), которое по толщине слоя исследуемой жидкости изменялось незначительно. Интенсивность излучения в фокусе достигала 10 МВт/см<sup>2</sup>. Жидкости облучались в кювете с прозрачным для лазерного излучения дном из ИК кварца. Исследовалось пропускание слоёв воды, этилового спирта и глицерина различной толщины. Облучение производилось как сверху, со стороны свободной поверхности жидкости, так и снизу, со стороны прозрачного для излучения дна кюветы, по нормали к поверхности.

В экспериментах измерялась энергия прошедшего сквозь кювету лазерного импульса в зависимости от его начальной энергии и толщины слоя жидкости. Форма падающего и прошедшего импульсов регистрировалась с использованием лавинного фотодиода и запоминающего осциллографа. По контуру отпечатка на термочувствительной бумаге исследовалась форма лазерного пятна до и после прохождения излучения сквозь слой жидкости.

Динамика воздействия лазерного излучения на жидкость записывалась на видеокамеру (время экспозиции 20 мс) с последующей обработкой видеоизображений с помощью стандартных графических редакторов. Несмотря на то что лазерное излучение невидимо, визуализация изучаемых процессов была возможна благодаря рассеянию излучения лампы накачки на парах и неоднородностях жидкости. Лампа накачки эрбиевого лазера имеет характерный спектр в видимом диапазоне, что позволяет осуществить временную привязку наблюдаемых процессов к лазерному импульсу.

### 3. Экспериментальные результаты

Лазерный импульс, воздействующий на поглощающую жидкость как со стороны её свободной поверхности, так и сквозь прозрачное для излучения дно кюветы, частично проходит сквозь неё. Наиболее детально было изучено прохождение лазерного импульса сквозь слой воды при его облучении сверху. На рис.1 представлены зависимости пропускания воды от толщины её слоя при различных энергиях лазерного импульса. В условиях нашего эксперимента наблюдалось прохождение излучения сквозь слой воды толщиной до 8 мм. Доля прошедшей сквозь слой воды энергии растёт как с уменьшением его толщины, так и с увеличением энергии лазерного импульса (рис.2). Сравнение пропускания воды с пропусканием других жидкостей (этанол, глицерин) показывает, что при одинаковых экспериментальных условиях вода менее прозрачна (рис.3). В пределах погрешности эксперимента этанол и глицерин одинаково пропускают лазерное излучение.

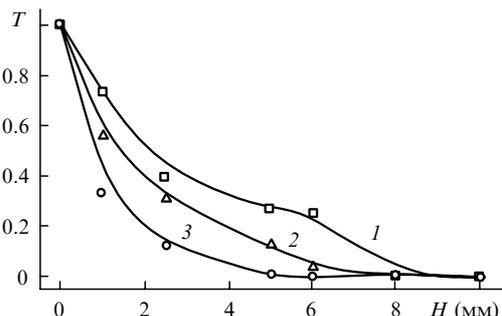


Рис.1. Зависимости пропускания воды от толщины её слоя при энергии лазерного импульса, 0,5 (1), 0,3 (2) и 0,1 Дж (3).

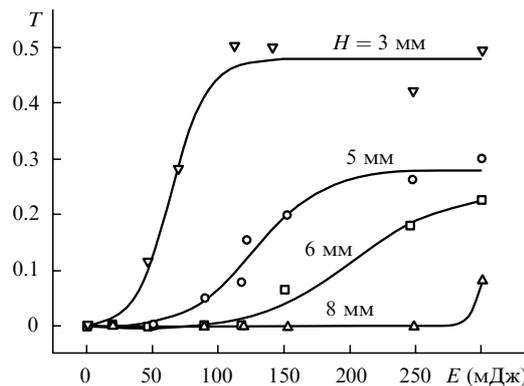


Рис.2. Зависимости пропускания воды от энергии лазерного импульса при разных толщинах слоя воды H.

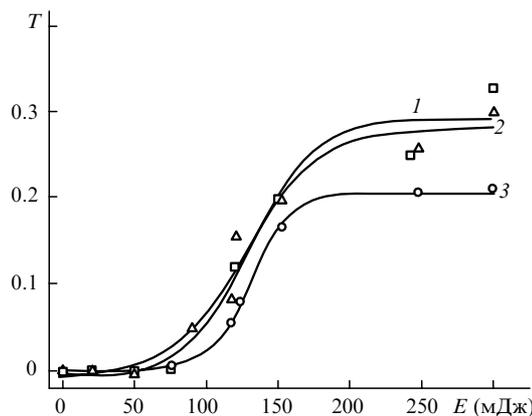


Рис.3. Зависимости пропускания глицерина (1), этанола (2) и воды (3) от энергии лазерного импульса при толщине слоя жидкости 5 мм.

Осциллограммы падающего и прошедшего сквозь слой воды лазерного импульса приведены на рис.4. Видно, что одновременно с энергией уменьшается длительность прошедшего импульса. Форма лазерного пятна после прохождения сквозь слой жидкости существенно не изменяется.

По данным видеосъёмки, лазерный импульс, воздействующий на жидкость по нормали со стороны её свободной поверхности, приводит к образованию и развитию в ней канала. На рис.5 показаны каналы, образующиеся в воде и глицерине под действием лазерного импульса с энергией 0,5 Дж. Характерные диаметры каналов, возникающих в жидкостях при прохождении сквозь них лазерного импульса, составляют 1 мм при исходном диаметре лазерного пучка ~200 мкм. Такие же каналы возникают и при облучении жидкости снизу. После окончания лазерного импульса канал распадается на много-

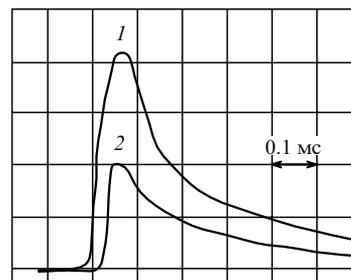
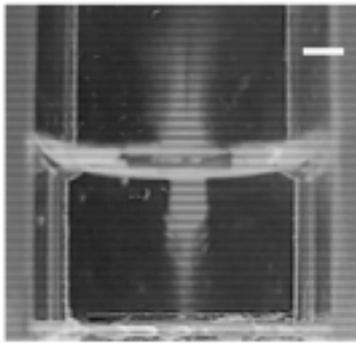
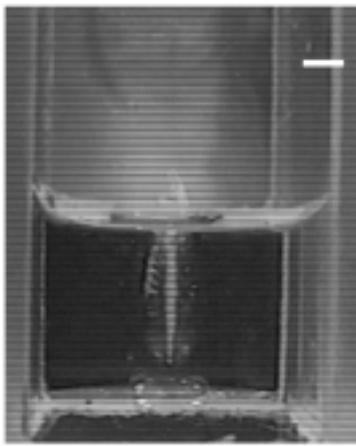


Рис.4. Осциллограммы лазерного импульса до (1) и после (2) прохождения сквозь слой воды толщиной 5 мм. Расположение импульсов вдоль временной оси произвольно.



а



б

Рис.5. Каналы, образующиеся при прохождении лазерного импульса сквозь воду (а) и глицерин (б). Метка соответствует 3 мм.

численные пузырьки диаметром 1–2 мм. При обоих направлениях облучения прохождение лазерного импульса сквозь слой жидкости сопровождалось формированием струи жидкости, направленной от её свободной поверхности (рис.6).

При облучении свободной границы жидкости сверху струя возникает после прохождения импульса в процессе схлопывания канала, в то время как при облучении жидкости снизу, сквозь прозрачное дно кюветы, формирование струи начинается в процессе развития канала. Дальнейшее движение струи вверх продолжается после окончания лазерного импульса. Струи жидкости с наибольшим отношением высоты к диаметру наблюдались при облучении глицерина снизу. Высота струи в этом случае составляла около 10 см (рис.7), тогда как для воды или

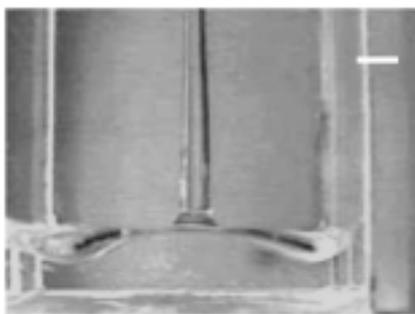


Рис.6. Струя, образующаяся при облучении воды со стороны прозрачного дна кюветы. Метка соответствует 3 мм.

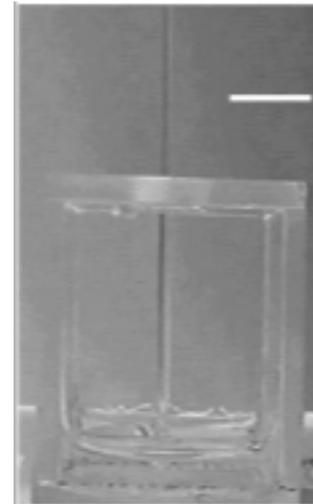


Рис.7. Струя, образующаяся при облучении глицерина со стороны прозрачного дна кюветы. Метка соответствует 1 см.

этанола высота струи не превышала 1–2 см. На заключительной стадии развития струя распадалась на капли, падающие на поверхность жидкости.

Во время воздействия лазерного импульса на жидкость над её поверхностью возникает направленная струя пара. В случае воды и спирта она распространяется преимущественно перпендикулярно свободной поверхности жидкости. Интенсивное рассеяние излучения лампы накачки на струе пара свидетельствует о его перенасыщенности. Такой пар заметно поглощает лазерный импульс, о чем свидетельствует образующийся в нем канал (см. рис.5,а).

#### 4. Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что прохождение лазерного импульса сквозь сильнопоглощающую жидкость напрямую связано с формированием в ней канала. В наших экспериментальных условиях большие длительности лазерного импульса (1 мс) позволяют реализовывать достаточно протяжённые каналы, достигающие в длину около 1 см. Энергия, необходимая для нагрева и испарения жидкости (вода, этанол) в объеме лазерного пучка заметно превышает энергию лазерного импульса. Таким образом, объем жидкости, которую может испарить лазерный импульс, несопоставим с объемом образующегося канала, и, следовательно, в основе его образования лежит механизм, отличный от тривиального испарения.

Воздействие мощного лазерного излучения на сильнопоглощающую жидкость связано с интенсивным поверхностным испарением, что приводит к её движению под реактивным действием паров отдачи [6, 12]. Подобный механизм составляет основу кинжального проплавления, состоящего в скачкообразном увеличении глубины проплавления металла при превышении некоторой пороговой интенсивности лазерного излучения [6]. Интенсивное испарение с поверхности жидкости под действием лазерного излучения приводит к неустойчивости плоского фронта испарения [13] и к быстрому уменьшению кривизны поверхности при развитии канала в глубь жидкости.

На основе представлений, развитых в [12], можно для различных веществ получить оценки пороговой интенсивности  $q$ , при которой в этих веществах возможно формирование канала за счёт действия давления паров отдачи. Для жидкостей значения  $q$  на несколько порядков ниже, чем для металлов. Например, для воды  $q \sim 3 \times 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>, в то время как для легкоплавких металлов  $q \sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а для тугоплавких металлов  $q \sim 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Это означает, что образование канала в жидкости и прохождение по нему излучения реализуются при весьма умеренных интенсивностях лазерного излучения по сравнению с металлами.

Скорость распространения канала в жидкости определяется интенсивностью излучения на границе раздела жидкость – пар, поэтому она должна уменьшаться по мере роста глубины канала. С другой стороны, по мере развития канала в глубь жидкости меняются условия испарения, что может приводить к стационарному режиму развития канала в жидкости [11].

Оценим среднюю скорость  $V$  распространения канала под действием лазерного импульса. Максимальная энергия, которая может быть затрачена на прохождение слоя жидкости толщиной  $h$ , близка к полной энергии пучка. Следовательно, время развития канала в слое близко к полной длительности лазерного импульса  $\tau \sim 1$  мс. Для  $h \sim 1$  см средняя скорость распространения составляет  $\sim 10$  м/с. Теоретическая оценка скорости развития канала с учетом как динамики фронта испарения, так и динамики движения жидкости затруднительна и требует совместного решения уравнений теплопроводности и Навье – Стокса. В известной нам литературе такие расчёты отсутствуют. Если принять, что скорость развития канала равна скорости движения фронта испарения  $V(T)$ , то выражение для неё записывается следующим образом [6]:

$$V(T) = \frac{P(T)}{\rho} \left( \frac{A_m}{2\pi N_a T} \right)^{1/2},$$

где  $P(T)$  – давление пара;  $\rho$  – плотность жидкости;  $A_m$  – атомный вес;  $N_a$  – число Авогадро;  $T$  – температура жидкости. Оценка скорости движения фронта испарения воды при  $P(T) = 1$  атм и  $T = 373$  К даёт  $V \sim 0.1$  м/с, что на два порядка отличается от экспериментально наблюдающейся скорости движения канала в жидкостях. Такое отличие скорости испарения от средней скорости движения канала в направлении оси пучка свидетельствует о существенном вкладе изменения кривизны границы жидкости под действием отдачи паров в динамику её движения.

Как видно из осциллограммы на рис. 4, при прохождении лазерного импульса сквозь слой сильнопоглощающей жидкости часть энергии пучка расходуется на образование канала, а остальная часть проходит по этому каналу. Меньшее пропускание воды по сравнению с другими исследованными жидкостями определяется ее высокой удельной теплотой испарения, составляющей  $2.26 \times 10^3$  Дж/г, по сравнению с  $0.84 \times 10^3$  Дж/г для этанола и  $0.82 \times 10^3$  Дж/г для глицерина. В связи с этим энергия, необходимая для образования канала в слое воды, больше, чем в других жидкостях, при прочих равных условиях.

Следует отметить, что формирование канала при действии интенсивного лазерного излучения приводит к изменению оптических характеристик области лазерного

воздействия. В отличие от жидкости, пары воды, заполняющие канал при его развитии, являются практически прозрачными для излучения эрбиевого лазера вследствие разрыва водородных связей при фазовом переходе жидкость – пар и уменьшения их концентрации при дальнейшем нагреве пара [14, 15]. По этой причине формально в качестве механизма просветления жидкости можно рассматривать изменение плотности среды при её лазерном испарении [1]. Плотный пар, образующийся в канале и состоящий из микрокапель жидкости, может заметно поглощать лазерное излучение и тем самым вносить свой вклад в общее пропускание слоя жидкости.

Полученные результаты позволяют предположить, что процесс образования канала может быть существенным и приводить к наблюдаемому просветлению жидкости для более коротких импульсов, например наносекундных и пикосекундных. В частности, в экспериментальных условиях работ [1, 3, 16] во время лазерного импульса возможно формирование полости, подобной каналу. При толщине слоя жидкости (толщине кюветы), меньшей диаметра пучка, канал вырождается в паровой пузырь, через который проходит лазерное излучение.

Таким образом, в работе показано, что прохождение лазерного излучения сквозь сильнопоглощающую жидкость обусловлено образованием в ней канала, формируемого самим лазерным импульсом. Канал заполнен прозрачным для лазерного излучения паром. Формирование канала обусловлено продавливанием поверхности жидкости вследствие импульса отдачи пара (кинжальный режим). Этот механизм образования канала энергетически является более выгодным, чем испарение всей жидкости в объеме, занимаемом лазерным пучком.

Авторы выражают благодарность С.С.Алимпиеву и С.М.Никифорову за возможность проведения экспериментов с эрбиевым лазером. Работа выполнена в рамках реализации проектов РФФИ (гранты № 01-02-17724, 01-02-16495, 02-02-16549 и 00-15-96636).

1. Водопьянов К.Л., Кулевский Л.А., Пашинин П.П., Прохоров А.М. *ЖЭТФ*, **82**, 1820 (1982).
2. Водопьянов К.Л., Кулевский Л.А., Михалевич В.Г., Родин А.М. *ЖЭТФ*, **91**, 114 (1986).
3. Breguet J., Luthy W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 207 (1990).
4. Sa'ar A., Gal D., Wallach R., Akselrod S., Katzir A. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1556 (1987).
5. Антонов А.А., Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков А.В. *Квантовая электроника*, **4**, 1747 (1977).
6. Бункин Ф.В., Трибельский М.И. *УФН*, **130**, 193 (1980).
7. Zweig A.D., Frenz M., Romano V., Weber H.P. *Appl. Phys. B*, **47**, 259 (1988).
8. Kim D., Ye M., Grigoropoulos C.P. *Appl. Phys. A: Gen. Phys.*, **67**, 169 (1998).
9. Silenok A.S., Steiner R., Fisher M., Stock K., Hibst R., Konov V.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1646**, 322 (1992).
10. Andrews J.G., Atthey D.R. *J. Phys. D*, **9**, 2181 (1976).
11. Forrer M., Romano V., Weber H., Silenok A., Konov V.I. *J. Appl. Phys.*, **74**, 720 (1993).
12. Трибельский М.И. *Квантовая электроника*, **5**, 804 (1978).
13. Анисимов С.И., Трибельский М.И., Епельбаум Я.Г. *ЖЭТФ*, **78**, 1597 (1980).
14. Юхневич Г.В. *Инфракрасная спектроскопия воды* (М.: Наука, 1973).
15. Wyatt P.J., Stull V.P., Plass G.N. *Appl. Opt.*, **3**, 229 (1964).
16. Водопьянов К.Л., Кулевский Л.А., Лукашёв А.В., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **30**, 975 (2000).