

Измерение нелинейного коэффициента отражения лазерного излучения с длиной волны 2940 нм от границ раздела кварцевое стекло – вода и кварцевое стекло – этиловый спирт

Э.С.Гулямова, Н.Н.Ильичев, П.П.Пашинин, В.И.Полянский, А.В.Сидорин

Измерен коэффициент отражения импульса YAG:Er³⁺- лазера от границ плавленый кварц–вода и плавленый кварц–этиловый спирт при высокой (0.9 Дж/см²) и низкой (5 мДж/см²) плотностях энергии падающего излучения. Обнаружена нелинейность динамики коэффициента отражения для мощного излучения во время действия лазерного импульса.

Ключевые слова: нелинейный коэффициент отражения, граница раздела, YAG:Er³⁺-лазер.

1. Введение

Известно, что вода имеет большой коэффициент поглощения ($\sim 1.3 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$) для излучения YAG:Er³⁺-лазера ($\lambda = 2940 \text{ нм}$) [1]. Это позволяет обеспечить большой вклад энергии в единицу объема воды ($\sim 10^4 \text{ Дж/см}^3$) при облучении ее поверхности импульсами YAG:Er³⁺-лазера (плотность энергии на входе около 1 Дж/см^2). Если использовать лазер с модулированной добротностью, то нагрев воды происходит за $100\text{--}200 \text{ нс}$, и в области взаимодействия возможно существование ее сильно неравновесного состояния с температурой $1500\text{--}2000 \text{ }^\circ\text{C}$ [2] при практически неизменной плотности. Возникновение, существование и распад такого состояния сопровождается различными, в том числе акустическими [3–5] и оптическими [2, 6, 7], эффектами. Так, например, в [2] обнаружено значительное уменьшение коэффициента поглощения излучения мощного YAG:Er³⁺-лазера в тонком слое воды. В [7] наблюдалось сильное уменьшение показателя преломления воды для излучения в видимой части спектра. Поэтому исследование взаимодействия мощного ИК излучения с водой представляет интерес с точки зрения физики неравновесных состояний воды.

Интерес к исследованию процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного ИК излучения с водой, обусловлен также практическими потребностями медицины, поскольку биологические ткани содержат в себе воду и поэтому хорошо поглощают излучение с определенными длинами волн в этой части спектра. В качестве примера можно указать обзор [8], в котором освещены разные аспекты взаимодействия ИК излучения с биологическими тканями, а также работу [9], где приведены результаты исследования абляции биологических тканей под действием мощного излучения YAG:Er³⁺-лазера.

Так как излучение с длиной волны 2940 нм поглощается в тонком слое воды, то наиболее сильно изменение ее

состояния должно сказаться на коэффициенте отражения от границы вода–подложка. Другой жидкостью с высоким коэффициентом поглощения на этой длине волны является этиловый спирт. Вода и этиловый спирт на $\lambda = 2940 \text{ нм}$ имеют разные показатели преломления, а их коэффициенты поглощения различаются в несколько раз. Кроме того, термодинамические характеристики этих веществ также различны. В связи с этим интересно сравнить поведение коэффициентов отражения мощного излучения от границ плавленого кварца с водой и с этиловым спиртом. В настоящей работе измеряются коэффициенты отражения от границ раздела плавленый кварц–вода и плавленый кварц–этиловый спирт для мощного и ослабленного ИК излучения, а также зависимости коэффициентов отражения от температуры.

Следует отметить, что почти во всех предыдущих исследованиях взаимодействия мощного ИК излучения с водой [2, 3, 6, 7] измерялись характеристики прошедшего через кювету с водой излучения. Исключением является работа [4], в которой было измерен коэффициент отражения мощного излучения с $\lambda = 2940 \text{ нм}$ от поверхности раздела фианит–вода в режиме полного внутреннего отражения. Насколько нам известно, об измерениях коэффициента отражения мощного ИК излучения от границы раздела плавленый кварц – сильно поглощающая жидкость при угле падения, близком к нормальному, во время действия импульса излучения до сих пор не сообщалось.

2. Схема эксперимента и его результаты

Оптическая схема установки приведена на рис.1. Излучение лазера на кристалле YAG:Er³⁺ с активной модулирующей добротности и с длиной волны излучения 2940 нм падало на поверхность раздела кварцевое стекло–жидкость или воздух. Энергия импульса излучения лазера была равна 12 мДж , длительность импульса $\sim 220 \text{ нс}$, поперечное распределение – TEM₀₀ мода. Плотность энергии на поверхности раздела составляла 0.9 Дж/см^2 для мощного излучения (сильное поле) и 5 мДж/см^2 – в случае ослабленного излучения (слабое поле). Отраженное от границы раздела излучение регистрировалось фотодиодом 4, падающее излучение – фотодиодом 2. При измерении коэффициента отражения в сильном поле фильтры 5 находились перед фотодиодом 4, а при измерении коэф-

Э.С.Гулямова, Н.Н.Ильичев, П.П.Пашинин, В.И.Полянский, А.В.Сидорин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ilichev@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 28 марта 2016 г., после доработки – 31 мая 2016 г.

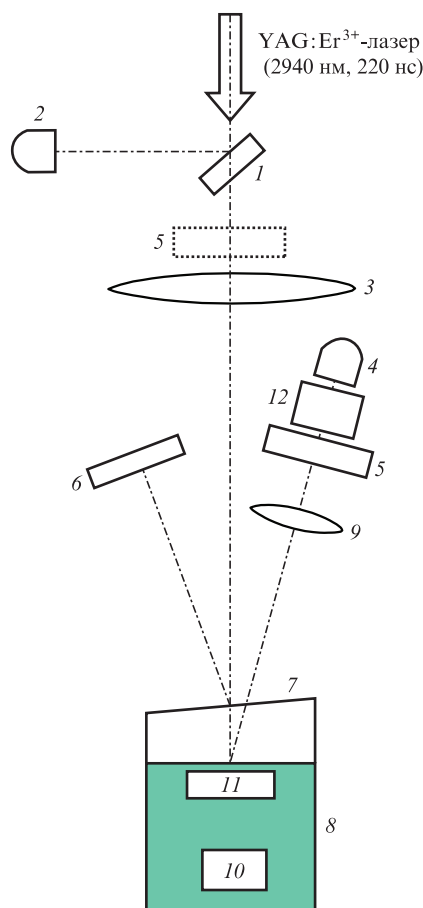
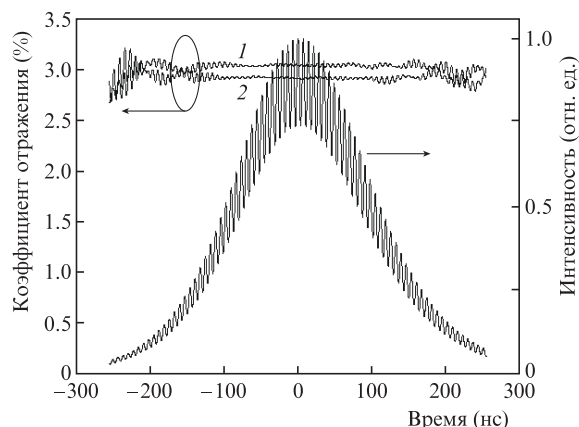


Рис.1. Схема установки:

1 – подложка, отводящая излучение на фотодиод 2; 2 – фотодиод PD29, регистрирующий падающее на границу раздела вода–кварцевое стекло излучение (угол падения излучения на границу раздела около 10°); 3 – фокусирующая линза из BaF_2 ($F = 300$ мм); 4 – измерительный фотодиод PD29, регистрирующий отраженное от границы раздела жидкость–кварцевое стекло излучение; 5 – ослабляющие фильтры; 6 – экран, задерживающий излучение, отраженное от передней грани подложки из кварцевого стекла; 7 – клиновидная подложка из кварцевого стекла, закрывающая жидкость; 8 – кювета с водой или этиловым спиртом; 9 – линза из CaF_2 (диаметр 20 мм, $F = 60$ мм); 10 – нагреватель; 11 – датчик температуры; 12 – рассеиватель, состоящий из 14 пластин ГГГ (толщина 350 мкм, диаметр 5 мм), установленных в полированной медной трубе.

коэффициента отражения в слабом поле они устанавливались перед линзой 3 (показано на рис.1 пунктиром). Внутри кюветы 8 находились датчик температуры 11 и нагреватель 10. Рассеиватель 12 помещался в фокальную плоскость линзы 9 перед фотодиодом 4. Такая конструкция должна была устранить влияние изменения расходимости отраженного от границы раздела излучения на сигнал с фотодиода.

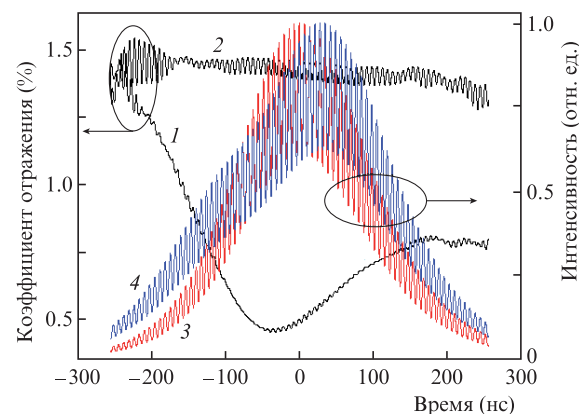
Коэффициент отражения измерялся следующим образом. Из сигналов u_1 и u_2 , регистрируемых с фотодиодов 2 и 4 соответственно, вычитались их постоянные составляющие u_{01} и u_{02} . Чтобы убрать высокочастотные составляющие шума сигналов $U_1 = u_1 - u_{01}$ и $U_2 = u_2 - u_{02}$, проводилось их преобразование Фурье и убирались все фурье-компоненты с частотой выше частоты межмодовых биений. Затем выполнялось обратное преобразование Фурье. В результате получали сигналы U_{f1} и U_{f2} . В каждый момент времени бралось отношение этих сигналов $r = U_{f1}/U_{f2}$. Измерения начинались с того момента, когда в

Рис.2. Поведение коэффициента отражения от границы кварцевое стекло–воздух во время действия лазерного импульса в случае сильного (0.9 Дж/см², 1) и слабого (5 мДж/см², 2) полей, а также интенсивности падающего излучения, нормированной на максимум.

измерительном канале излучение отражалось от поверхности раздела кварцевое стекло–воздух (пусть в этом случае $r = r_0$). Затем в кювету наливалась вода (или этиловый спирт) и вновь измерялись сигналы падающего и отраженного излучения. Если отношение сигналов в этом случае было r_1 , то коэффициент отражения вычислялся как $R = R_0 r_1 / r_0$, то коэффициент отражения вычислялся как $R = R_0 r_1 / r_0$ для каждого момента времени (здесь $R_0 = 3.0\%$ – расчетный коэффициент отражения от границы кварцевое стекло–воздух при нормальном падении (показатель преломления $n = 1.42$ для длины волны 2900 нм [10]).

На рис.2 приведены измеренные значения коэффициента отражения от границы кварцевое стекло–воздух в сильном и слабом полях в зависимости от времени, а также нормированная на максимум интенсивность падающего излучения. Видно, что во время действия импульса коэффициенты отражения как для слабого, так и для сильного полей практически постоянны и близки друг к другу.

На рис.3 приведены те же зависимости коэффициента отражения для сильного и слабого полей, но от границы раздела кварцевое стекло–вода. Видно, что в случае сильного поля коэффициент отражения уменьшается от 1.4% до минимального значения 0.4% , а затем возрастает до

Рис.3. Поведение коэффициента отражения от границы кварцевое стекло–вода во время действия лазерного импульса в случае сильного (0.9 Дж/см², 1) и слабого (5 мДж/см², 2) полей, а также нормированных на максимум сигналов падающего (3) и отраженного (4) излучения в сильном поле.

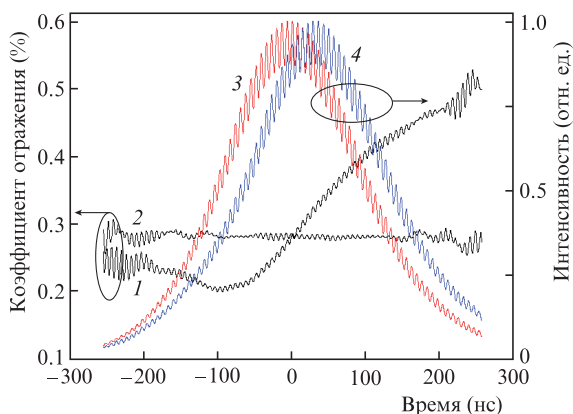


Рис.4. Поведение коэффициента отражения от границы кварцевое стекло–этиловый спирт во время действия лазерного импульса в случае сильного (0.9 Дж/см^2 , 1) и слабого (5 мДж/см^2 , 2) полей, а также нормированных на максимум сигналов падающего (3) и отраженного (4) излучения в сильном поле.

0.7% в конце импульса. В случае слабого поля коэффициент отражения во время действия импульса практически постоянен и составляет примерно 1.4%, что близко к расчетному значению 1.5% при температуре 0°C , если использовать оптические постоянные воды из [1]. На этом же рисунке приведены импульсы падающего и отраженного излучения, нормированные на максимум. Видно, что формы этих импульсов различны, что сказывается на зависимости коэффициента отражения от времени.

На рис.4 приведены результаты тех же измерений для границы кварцевое стекло–этиловый спирт. Видно, что в начале действия импульса коэффициент отражения остается практически постоянным, а затем увеличивается от 0.28% до 0.5%.

Изменения коэффициента отражения как для воды, так и для этилового спирта после начала действия импульса можно объяснить нагревом тонкого слоя жидкости, прилегающего к подложке. Чтобы проверить возможность такого объяснения, были сняты зависимости коэффициента отражения от температуры в слабом поле (рис.5). Из рисунка видно, что для воды коэффициент отражения падает от 1.4% при 20°C до 0.75% при 90°C , что хорошо согласуется с его расчетным значением, если использовать данные для оптических постоянных воды при температуре 0°C и 50°C , приведенные в [1]. Для этилового спирта коэффициент отражения не зависит от температуры при ее изменении в диапазоне $20 - 70^\circ\text{C}$. Измеренный

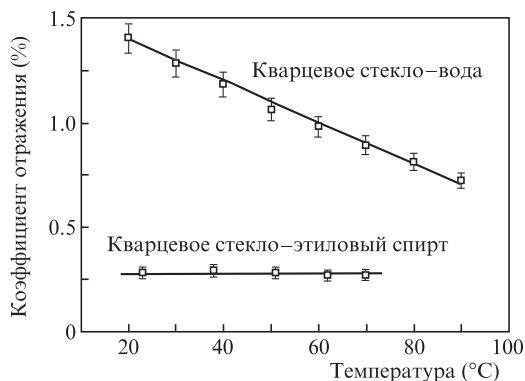


Рис.5. Зависимости коэффициента отражения от границ кварцевое стекло–вода и кварцевое стекло–этиловый спирт от температуры в слабом поле.

коэффициент поглощения этилового спирта на длине волны 2940 нм оказался равным 3100 см^{-1} .

Другим возможным механизмом уменьшения коэффициента отражения является просветление воды и этилового спирта под действием мощного излучения [2], когда происходит уменьшение мнимой части показателя преломления среды, что должно приводить к уменьшению коэффициента отражения.

Увеличение коэффициента отражения к концу импульса излучения как для воды, так и для этилового спирта можно объяснить уменьшением плотности вещества, контактирующего с подложкой, и возможным фазовым переходом.

3. Выводы

Измерен коэффициент отражения от границ плавленный кварц–вода и плавленный кварц–этиловый спирт во время действия импульса излучения с длиной волны 2940 нм . Для воды коэффициент отражения мощного излучения уменьшается от 1.4% (в начале импульса) до 0.4%, а затем растет до 0.7% к концу импульса излучения. Уменьшение коэффициента отражения можно объяснить нагревом воды и ее просветлением под действием мощного ИК излучения, а увеличение коэффициента отражения – снижением плотности слоя воды, контактирующего с подложкой, что должно приводить к уменьшению показателя преломления воды.

Для спирта коэффициент отражения в сильном поле в начале действия импульса остается практически постоянным, а затем растет от 0.28% до 0.5%.

Измерены зависимости коэффициента отражения от границ плавленный кварц–вода и плавленный кварц–этиловый спирт от температуры в слабом поле. Оказалось, что коэффициент отражения для воды падает в диапазоне температур $20 - 90^\circ\text{C}$, а для спирта остается постоянным в диапазоне температур $20 - 70^\circ\text{C}$.

Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что во время действия мощного импульса излучения подложка контактирует с нагретым веществом, плотность которого близка к плотности жидкости как для воды, так и для спирта, т.е. во время действия импульса излучения с плотностью энергии около 1 Дж/см^2 подложка остается «мокрой».

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-02-00807а, 15-59-31817 РТ-оми, 15-52-45024 ИНДа) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-451.2014.2.

1. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. *Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник* (Л.: Химия, 1984).
2. Водопоьянов К.Л. *ЖЭТФ*, **97** (1), 205 (1990).
3. Водопоьянов К.Л., Кулевский Л.А. и др. *ЖЭТФ*, **91** (1), 114 (1986).
4. Бункин Ф.В., Водопоьянов К.Л., Кулевский Л.А. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **49** (3), 558 (1985).
5. Samokhin A.A., Il'ichev N.N., et al. *Appl. Phys. B*, **105** (3), 551 (2011).
6. Водопоьянов К.Л., Карасев М.Е., Кулевский Л.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **14** (4), 324 (1988).
7. Водопоьянов К.Л., Кулевский Л.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 975 (2000).
8. Vogel A., Venugopalan V. *Chem. Rev.*, **103** (2), 577 (2003).
9. Apitz I., Vogel A. *Appl. Phys. A*, **81**, 329 (2005).
10. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. *Оптические материалы для инфракрасной техники* (М.: Наука, 1965).