

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 537.521.7

**ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ПРОБОЙ В ПОРИСТОМ И КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ В УСЛОВИЯХ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**В. Н. Баграташвили<sup>\*)</sup>, Р. В. Волков, В. М. Гордиенко, И. А. Макаров,  
С. И. Цыпина<sup>\*)</sup>, Е. А. Чутко<sup>\*)</sup>, А. А. Шашков**  
(кафедра общей физики и волновых процессов)

E-mail: chutko@femtorsrv.phys.msu.su

**Исследовано взаимодействие фемтосекундного лазерного излучения с микропористым стеклом Vусог. Определено значение порога пробоя пористого стекла и проведено сравнение его со значением для кварцевого стекла.**

**Введение**

В последнее время пористые материалы, такие, как кремний, алюминий, стекло, все шире используются в технологии. Особую значимость микропористого стекла обуславливает прозрачность в видимом диапазоне длин волн. Заполняя внутренний объем пористого стекла можно существенным образом изменять его оптические и механические свойства, а также отклик на лазерное воздействие. К настоящему времени рассмотрены возможности применения микропористого стекла для изготовления микроэлектромеханических устройств (MEMS) [1], записи дифракционных решеток [2]. Нами рассматривалась принципиальная возможность использования пористого стекла, импрегнированного металлорганическим соединением, для локального формирования центров редкоземельных металлов в объеме стекла с помощью лазерного излучения [3]. Подобное микроструктурирование прозрачных материалов обычно проводится с использованием жестко сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения [4]. Однако до настоящего времени вопрос взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с микропористым стеклом не был подробно исследован.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей распространения лазерного излучения и лазерно-индуцированного пробоя в объеме микропористого стекла в условиях жесткой фокусировки. При этом экспериментальные результаты рассматривались в сравнении с данными для кварцевого стекла.

Для исследований мы использовали пористое стекло марки Vусог, основные параметры которого приведены в таблице [5]. Из этого стекла изготавливались образцы в форме параллелепипеда  $5 \times 3 \times 1.5$  мм с полированными гранями. Для удаления полировочной пасты и прочих загрязнений из пор заготовки вымачивались в течение суток в бензине, затем высушивались и отжигались 10 мин при температуре  $600^\circ\text{C}$ . Для минимизации последующего загрязнения образцы хранились в эксикаторе с силикагелем.

<sup>\*)</sup> Отдел перспективных лазерных технологий Института проблем лазерных и информационных технологий РАН.

**Состав и свойства пористого стекла Vусог**

Состав, %		Свойства	
SiO <sub>2</sub>	96.3	Диаметр пор, нм	$4 \pm 1$
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.95	Коэфф. преломления $n$	1.33
Na <sub>2</sub> O	0.04	Объем пор, %	28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub>	0.72	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.5

ливались образцы в форме параллелепипеда  $5 \times 3 \times 1.5$  мм с полированными гранями. Для удаления полировочной пасты и прочих загрязнений из пор заготовки вымачивались в течение суток в бензине, затем высушивались и отжигались 10 мин при температуре  $600^\circ\text{C}$ . Для минимизации последующего загрязнения образцы хранились в эксикаторе с силикагелем.

Рассеяние излучения на пористой структуре [6] может ограничить значение интенсивности, достигаемой в точке фокуса в объеме пористого стекла. Поэтому прежде всего мы попытались оценить величину и характер рассеяния лазерного излучения в исследуемых образцах. Для выяснения типа рассеяния мы воспользовались методикой, приведенной в работе [6], позволяющей по спектру пропускания образца определить показатель степени  $p$  в выражении для коэффициента светоослабления  $K_\lambda = A/\lambda^{-p}$ , где  $A$  — константа,  $\lambda$  — длина волны излучения. Степень  $p$  определяется как тангенс угла наклона зависимости  $-\lg(-\lg \tau)$  от  $\lg(\lambda, \text{нм})$ ,  $\tau$  — коэффициент пропускания мишени (рис. 1). Величина  $p = 2.8$  свидетельствует о том, что рассеяние не является чисто рэлеевским ( $p = 4$ ), а вызвано более сложными закономерностями [7]. Важно отметить, что на длине волны фемтосекундного лазера  $\lambda = 616$  нм пропускание мишени близко к 90%. Учитывая френелевское отражение от граней пористого стекла, которое при коэффициенте преломления  $n = 1.33$  составляет 2% от каждой грани,

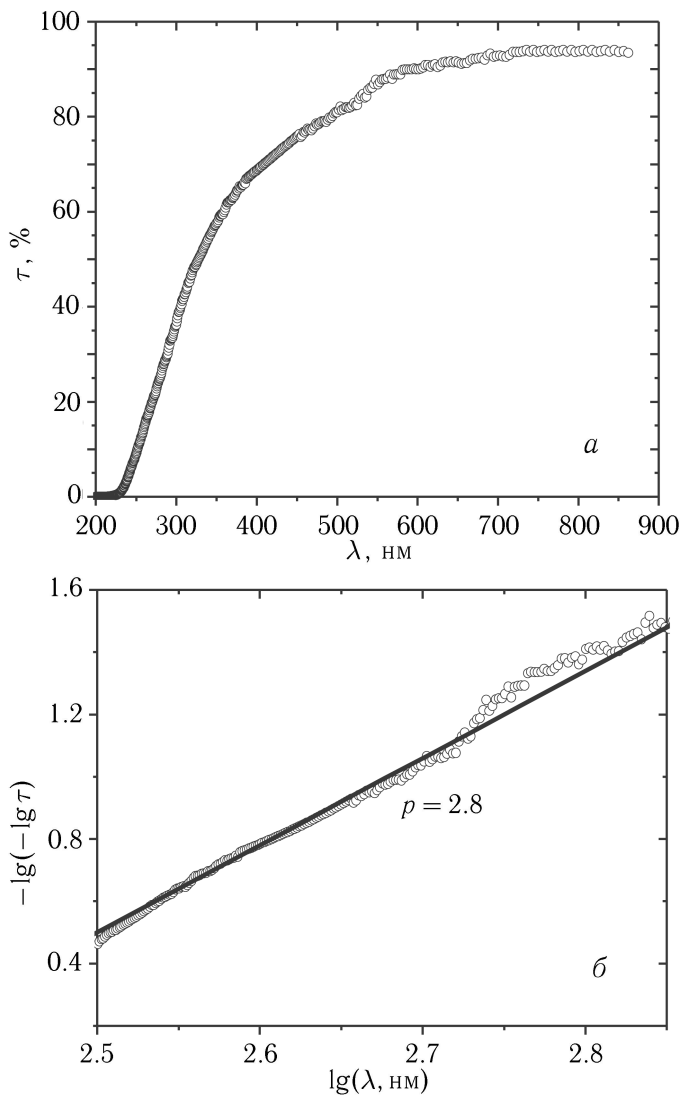


Рис. 1. Спектр пропускания чистого пористого стекла. Толщина образца 1.5 мм (а) и спектр пропускания чистого пористого стекла в координатах  $-\lg(-\lg \tau)$ ,  $\lg(\lambda)$  (б)

можно определить долю рассеянного излучения на длине волны  $\lambda = 616$  нм, которая составляет приблизительно 6%.

Кроме того, в пористых мишенях необходимо учитывать увеличение локального значения интен-

сивности излучения в порах [8]. Согласно формуле, приведенной в [8], поле световой волны в порах прозрачного диэлектрика составляет

$$E_{\text{pore}} = \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + 1} E_0,$$

где  $E_{\text{pore}}$  и  $E_0$  — напряженность поля световой волны в порах и однородном диэлектрике соответственно,  $\varepsilon = n^2$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, а  $n$  — его коэффициент преломления. Для стекла с показателем преломления  $n = 1.5$  поле световой волны увеличивается в 1.2 раза, что соответствует увеличению локальной интенсивности лазерного излучения в 1.5 раза.

### Экспериментальная установка

Изучение взаимодействия мощного, жестко сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения с микропористым стеклом проводилось на экспериментальной установке, изображенной на рис. 2. Излучение лазера на красителе ( $\lambda = 616$  нм,  $\tau = 200$  фс,  $W = 10$  мкДж) жестко сфокусировалось в глубь пористого стекла предварительно протестированной пластиковой асферической линзой, что позволяло достичь интенсивности излучения  $I \sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> в объеме мишени. Для тестирования линзы излучение He-Ne лазера фокусировалось ею в объем стеклянной пластины. Далее изображение перетяжки строилось увеличивающей оптической системой, состоящей из объектива с числовой апертурой  $NA = 0.7$ , линзы с фокусным расстоянием 10 см и окуляра с 15-кратным увеличением, и подавалось на ПЗС камеру (Princeton Instruments, Micromax,  $768 \times 512$  пикселей, размер пикселя  $9 \times 9$  мкм). Диаметр перетяжки, измеренный с помощью данной установки, составил 1.1 мкм (по уровню  $1/e$ ). Для измерения энергии лазерного импульса в пучок помещалась стеклянная пластинка, отклоняющая часть излучения на пироэлектрический измеритель энергии. Вплотную к задней стороне мишени помещалось оптоволокно диаметром 1 см, доставляющее более 70% прошедшей через мишень энергии лазерного излучения на фотодиод. Фотодиод и пироэлектриче-

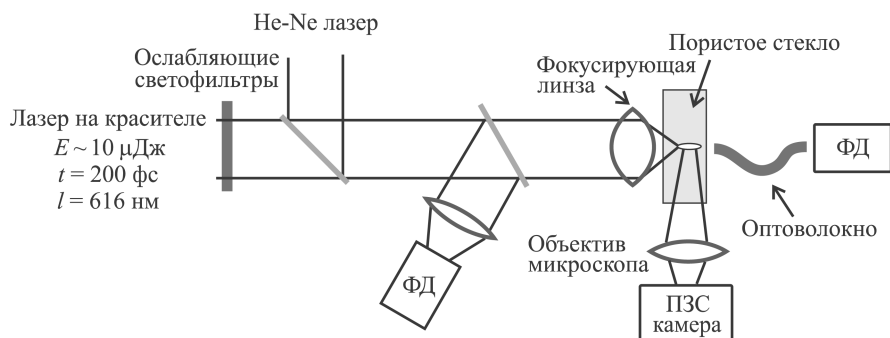


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для наблюдения пробоя в пористом стекле под действием фемтосекундного лазерного излучения

ский измеритель были предварительно калиброваны с помощью измерителя лазерной энергии ИЛД-2М. Пучок He-Ne лазера был совмещен с пучком лазера на красителе (см. рис. 2). Наблюдение рассеянного в объеме мишени излучения проводилось в направлении, перпендикулярном лазерному пучку, перенос изображения на ПЗС камеру ( $1392 \times 1036$  пикселей) осуществлялся объективом микроскопа с числовой апертурой  $NA = 0.11$ .

### Результаты

Определение порога пробоя в прозрачном пористом материале обычно проводится путем измерения зависимости величины прошедшей через образец энергии от падающей [9]. Пробой мишени сопровождается резким уменьшением пропускания. В нашем случае в условиях жесткой фокусировки фемтосекундного лазерного излучения в объем пористого стекла уменьшение пропускания наблюдалось при энергии лазерного импульса  $W_0 \cong 0.2$  мкДж (рис. 3). Пробой кварцевого стекла был зафиксирован при таком же значении энергии импульса (см. рис. 3). Таким образом, было обнаружено, что в случае фемтосекундного пробоя наличие развитой поверхности в пористом стекле не оказывает влияния на порог пробоя.

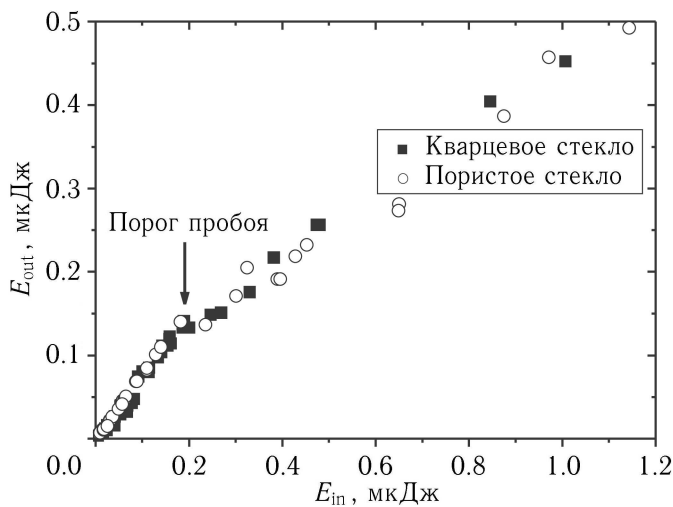


Рис. 3. Зависимость величины энергии, прошедшей через мишень из пористого и кварцевого стекла, от величины падающей на мишень энергии лазерного импульса

Облучение пористого стекла лазерным излучением с энергией импульса, превосходящей порог пробоя, вызывало разрушения в объеме мишени. Используя описанную выше экспериментальную установку, мы получили картины рассеяния He-Ne лазера на областях пробоя (модификациях) пористого стекла. Поскольку пористое стекло само по себе является рассеивающей средой, мы также регистрировали рассеяние пробного пучка в немодифицированной мишени и считали его фоновым

при дальнейшей обработке изображений модифицированных областей. Уровень сигнала рассеяния на модификации превышал уровень фона приблизительно в 3 раза. Типичные картины рассеяния в чистой и модифицированной мишени приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, области пробоя в пористом стекле вытянуты в направлении распространения лазерного излучения. При этом модификация, инициированная лазерным импульсом с большей энергией, имеет большую длину.

Зависимость длины модификации в пористом и кварцевом стекле от энергии лазерного импульса представлена на рис. 5. Легко видеть, что длины

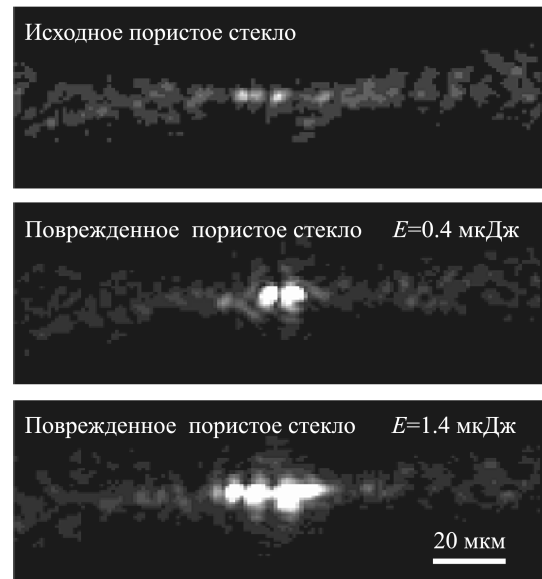


Рис. 4. Профильные изображения рассеяния He-Ne лазера в модифицированном и немодифицированном пористом стекле. Излучение He-Ne лазера и лазера на красителе падает на мишень справа

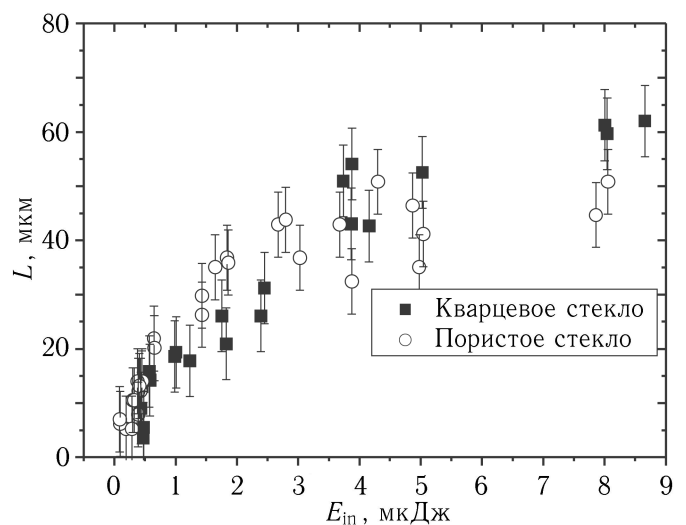


Рис. 5. Зависимость длины модификации, индуцированной в пористом стекле Vусог и плотном кварцевом стекле, от энергии лазерного импульса

модифицированных областей в пористом и плотном стекле при одинаковом значении энергии лазерного импульса приблизительно равны. Отметим, что в случае стекла размер модификации ограничивает упругость материала, а для пористого стекла область модификации может быть больше из-за наличия свободного объема.

### Выводы

Изучение фемтосекундного лазерного пробоя в объеме микропористого стекла в условиях жесткой фокусировки и его сравнение с пробоем в кварцевом стекле показало, что наличие пористой структуры не изменяет характера взаимодействия. Сравнение областей модификации, наводимых в объеме пористого стекла жестко сфокусированным лазерным излучением, с модификациями в обычном кварцевом стекле показало, что и те и другие имеют вытянутую в направлении распространения излучения форму. С увеличением энергии лазерного импульса длина области разрушения увеличивается, причем характер зависимости аналогичен в пористом и плотном стекле. Пороги пробоя, определенные в условиях жесткой фокусировки лазерного излучения в объеме обоих материалов, также показали хорошее совпадение этих величин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 03-02-17045, 03-02-16973) и Фонда поддержки ведущих научных школ России (грант НШ-1633.2003.2).

### Литература

1. Paik J.A., Fan S.K., Kim C.J. et al. // Mater. Res. 2002. **17**, N 8. P. 2121.
2. Sunil D., McQuarrie A. W., Gafney H.D. // Appl. Spectroscopy. 1998. **52**, N 7. P. 1014.
3. Chutko E.A., Tsygina S. I., Gordienko V.M. et al. // Abstr. of conf. ILATA-III. St. Petersburg, Russia. June 29–July 3, 2003. P. 25.
4. Glezer E.N., Mazur E. // Appl. Phys. Lett. 1997. **71**, N 4. P. 882.
5. Elmer T.H. // Engineered Materials Handbook. **4**: Ceramic and Glasses. 1992. P. 427; <http://www.corning.com/lightingmaterials/images/porous.pdf>.
6. Роскова Г.П., Морозова Э.Г., Баханов В.А. // Физика и химия стекла. 1991. **17**, № 4. С. 623.
7. Роскова Г.П., Цехомская Т.С., Вензель Б.И. // Физика и химия стекла. 1988. **14**, № 6. С. 911.
8. Bloembergen N. // Appl. Optics. 1973. **12**, N 4. P. 661.
9. Sun J., Longtin J.P., Norris P.M. // J. Non-Cryst. Sol. 2001. **281**. P. 39.

Поступила в редакцию  
06.12.05