

## Краткие сообщения

09

### Лазерное абляционное разрушение стеклянных композитов с наноразмерным покрытием $\text{TiO}_2$

© В.Г. Шеманин,<sup>1</sup> А.Б. Аткарская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новороссийский политехнический институт Кубанского государственного технологического университета, 353900 Новороссийск, Россия

<sup>2</sup> Филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 353912 Новороссийск, Россия  
e-mail: vshemanin@mail.ru, atkarsk06@mail.ru

(Поступило в Редакцию 14 ноября 2014 г.)

Выполнены исследования лазерного абляционного разрушения стеклянных композитов с наноразмерными покрытиями, получаемыми из растворов по золь-гель технологии. Обнаружены зависимости пороговой энергии разрушения образцов от величин показателя преломления пленок и пропускания света образцами. Пороговая плотность энергии увеличивается с ростом показателя преломления и уменьшается с уменьшением пропускания света в области 400–900 нм, что объясняется различием коэффициента отражения образцов.

В продолжение исследований, начатых в [1], была изучена лазерная абляция стеклянных композитов с наноразмерными однокомпонентными покрытиями  $\text{TiO}_2$ . Образцы были получены окунанием образцов листового термически полированного стекла размером  $60 \times 60 \times 4$  мм в пленкообразующие растворы, содержащие 2.5 или 5 wt.%  $\text{TiO}_2$ , с последующим извлечением с фиксированной скоростью 3.8, 5.8 или 17.3 мм/с. Для приготовления растворов использованы прекурсоры: изопропиловый спирт — растворитель, концентрированная соляная кислота — катализатор гидролиза алкоксида титана и тетраэтоксититан — источник  $\text{TiO}_2$ .

Целью настоящей работы является исследование зависимости пороговой плотности энергии абляционного разрушения стеклянных композитов с наноразмерным покрытием состава  $\text{TiO}_2$  под действием импульсного лазерного излучения наносекундной длительности от оптических характеристик композитов.

Для экспериментального исследования лазерного абляционного разрушения композитов были выполнены измерения значений пороговой плотности энергии лазерного излучения, при которых начинается пробой на поверхности образца. Пороговую энергию лазерного абляционного разрушения  $F_{bn}$ ,  $\text{J}/\text{cm}^2$  измеряли на лазерной абляционной станции, подробно описанной в [1,2]. Ее оптическая схема приведена на рис. 1.

Источником излучения служил лазер 1 на алюмоиттриевом гранате с неодимом, который генерировал на длине волны 1064 нм импульсы длительностью 20 нс с энергией до 0.15 Дж. Излучение лазера 1 фокусировалось объективом 4 на поверхность образца 5 нанокompозита. Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне от 1 до  $150 \text{ J}/\text{cm}^2$  достигалось как выбором фокусного расстояния объектива 4, так и ослаблени-

ем лазерного излучения калиброванными нейтральными светофильтрами НС 2.

Явление пробоя фиксировалось по наличию собственного свечения факела лазерной плазмы микроспектрометром FSD-8 (ИОФ РАН) 7 с волоконным вводом 6. Часть излучения лазера пластиной 3 направлялась через светофильтр ИКС-1 9 на фотодиод 10, электрический импульс с которого через линию задержки 8 служил для синхронизации запуска спектрометра 7. Вероятность пробоя на поверхности образца 5 определялась как отношение число событий с пробоем к общему числу лазерных импульсов. Как и ранее в [2], величина пороговой плотности энергии соответствовала вероятности пробоя 0.5.

Пропускание света композитами  $T$ , % измеряли с помощью микроспектрометра FSD-8, показатель преломления  $n_{\text{film}}$  спектроэллипсометром Uvisel 2 (HORIBA Jobin Yvon).

На первом этапе были выполнены исследования зависимости пороговой плотности энергии  $F_{bn}$  лазерного

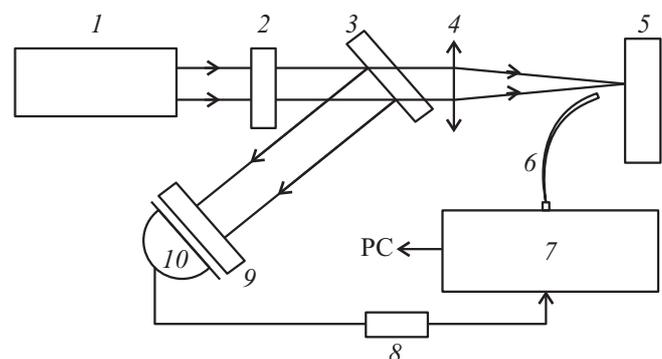
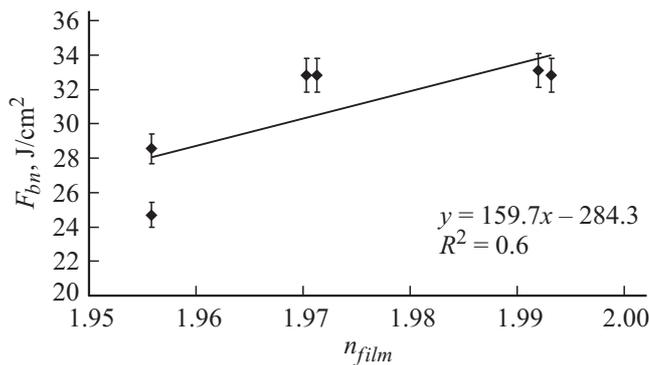
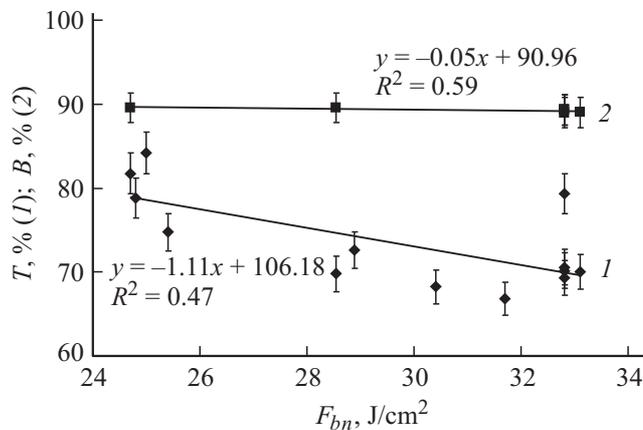


Рис. 1. Оптическая схема лазерной абляционной станции.



**Рис. 2.** График зависимости пороговой энергии разрушения композитов от показателя преломления наноразмерных покрытий  $\text{TiO}_2$ .



**Рис. 3.** Графики, иллюстрирующие зависимость пороговой энергии разрушения композитов от их измеренного (1) и рассчитанного (2) светопропускания.

абляционного разрушения образцов композитов от показателя преломления их покрытия  $n_{\text{film}}$ . На рис. 2 приведен график этой зависимости, который с достаточной степенью точности является линейным.

Для объяснения этой закономерности рассмотрим процесс взаимодействия лазерного излучения со стеклянным композитом. В нашей установке лазерный луч нормально падает на поверхность образца, при этом часть его отражается, а остальная взаимодействует с материалом покрытия композита, вызывая его разрушение. Чем больше доля отраженной энергии излучения, тем закономерно при более высоких пороговых плотностях энергии произойдет лазерное абляционное разрушение. При нормальном падении неполяризованного света на полированную поверхность образца коэффициент отражения  $R$  связан с показателем преломления покрытия  $n_{\text{film}}$  соотношением [3]

$$R = (n_{\text{film}} - 1)^2 / (n_{\text{film}} + 1)^2. \quad (1)$$

Соответственно чем выше значение  $n_{\text{film}}$ , тем больше коэффициент отражения на границе воздух–пленка и

выше пороговая плотность энергии абляционного разрушения  $F_{bn}$ . Это и подтверждается графиком на рис. 2.

График зависимости пороговой плотности энергии абляционного разрушения от пропускания света  $T$  пленкой приведен на рис. 3. Как и ранее, при нормальном падении неполяризованного света на полированную поверхность образца коэффициент пропускания  $B$  также связан с показателем преломления покрытия  $n_{\text{film}}$  соотношением [3]

$$B = 4n_{\text{film}} / (n_{\text{film}} + 1)^2. \quad (2)$$

Соответственно чем выше значение  $n_{\text{film}}$ , тем меньше коэффициент пропускания на границе воздух–пленка и выше пороговая плотность энергии абляционного разрушения  $F_{bn}$ . Это предположение подтверждается графиками на рис. 3.

Для объяснения различий между расчетными величинами  $B$  по формуле (2) и измеренными значениями  $T$  композита рассмотрим лазерное излучение интенсивности  $I_0$ , падающее на поверхность пленки. Это излучение частично отражается от ее поверхности ( $R$ ), рассеивается на неоднородностях ее микроструктуры ( $\mu$ ) и поглощается ( $A$ ) матрицей и  $d$ - и  $f$ -элементами, попадающими в стекло в виде примесей или специально вводимыми добавками для корректировки спектральных характеристик, и лишь оставшаяся часть ( $T$ ) проходит через пленку. Запишем связь этих коэффициентов согласно закону сохранения энергии в виде соотношения:

$$1 = R + \mu + A + T. \quad (3)$$

Учитывая, что все образцы подложки вырезаны из одного листа термически полированного стекла, сумму величин  $A$  и  $\mu$  можно оценить в предположении, что все потери определяются только рассеянием Рэлея на неоднородностях микроструктуры пленки или частицах [4]. Считая, что рассеяние Рэлея приводит увеличению потерь ( $\mu + A$ ) можно рассчитать эту величину, используя уравнение Рэлея в виде

$$\frac{I}{I_0} = 24\pi^3 \frac{(n_1^2 - n_0^2)^2}{(n_1^2 + 2n_0^2)^2} N \frac{V^2}{\lambda^4}, \quad (4)$$

где  $I$  и  $I_0$  — интенсивности рассеянного и падающего излучения на длине волны  $\lambda$ ,  $n_1$  и  $n_0$  — показатели преломления материала частиц в пленке и дисперсионной среды,  $N$  — счетная концентрация частиц объемом  $V$ .

Используя уравнение (4), оценим эти потери света в пленке для концентрации частиц  $7.5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , которая задается при приготовлении пленкообразующего раствора, и характерного размера частиц 9–10 нм. Диапазон изменения рассчитанной величины потерь составил 19–36%, что хорошо совпадает с разницей ординат графиков на рис. 3. В этом случае можно говорить об обратной пропорциональной зависимости между пороговой плотностью энергии и пропусканием света пленкой, что и подтверждается этими графиками на рис. 2.

Таким образом, экспериментально получены закономерности изменения пороговой плотности энергии лазерной абляции композитов от показателя преломления пленки и пропускания композита в диапазоне 400–900 nm, которые подтверждают результаты в [5] и могут быть использованы для прогнозирования оптической прочности стеклянных композитов с покрытиями разрабатываемых составов.

## Список литературы

- [1] *Shemanin V.G., Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V., Privalov V.E.* Physics of Extreme States of Matter. Ed. by V.E. Fortov. Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2014. P. 135–137.
- [2] *Воронина Э.И., Ефремов В.П., Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 5. С. 143–145.
- [3] *Саржевский А.А.* Оптика. М.: Едиториал УРСС. 2004. 299 с.
- [4] *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Физматлит, 2003. 529 с.
- [5] *Аткарская А.Б., Мкртычев О.В., Шеманин В.Г.* // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. Вып. 8/2. С. 238–239.