

## ЛУЧЕВАЯ ПРОЧНОСТЬ НАНЕСЕННЫХ НА ПОГЛОЩАЮЩУЮ ПОДЛОЖКУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В. Ю. ХРАМОВ, С. В. ГАГАРСКИЙ, А. Н. СЕРГЕЕВ, Р. М. АХМАДУЛЛИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: mg\_phoenix@yahoo.com*

Выявлены особенности покрытий  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , нанесенных на поглощающую подложку из монокристаллического карбида кремния (SiC), вызывающие снижение их лучевой прочности. Экспериментально показано, что вследствие поперечных микросмещений пучка в процессе измерений лучевая прочность образца снижается до 2—3 раз. С использованием уравнения теплопроводности и метода конечных элементов в системе CAE (computer-aided engineering) проведено моделирование воздействия лазерного излучения с поперечным смещением пучка, а также рассчитана динамика изменения температуры и наводимых термоиндуцированных напряжений внутри вышеупомянутых образцов.

**Ключевые слова:** *лучевая прочность отражающих зеркал, диэлектрические покрытия, поглощающая подложка, порог лазерного индуцированного разрушения, монокристаллический карбид кремния, термоиндуцированные напряжения*

**Введение.** К оптическим элементам и материалам, предназначенным для применения в условиях космоса, выдвигают повышенные требования по их массогабаритным характеристикам и теплофизическим свойствам материала. Материал должен быть легким, прочным, иметь небольшой коэффициент теплового расширения [1]. С этой точки зрения карбид кремния (SiC) представляет интерес в качестве подложки для многослойного отражающего диэлектрического зеркала. Однако этот материал поглощает излучение в ближнем ИК-диапазоне, в том числе на длине волны твердотельных неодимовых лазеров (1,06 мкм) [2].

В настоящей работе измерены пороги лазерно-индуцированного разрушения (ЛИР) отражающих диэлектрических покрытий  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , нанесенных на поглощающую подложку монокристаллического карбида кремния. Также исследованы ведущие к снижению лучевой прочности особенности лазерного разрушения указанных образцов. Для анализа механизмов возникновения экспериментально выявленных особенностей проведено компьютерное моделирование динамики нагрева и термоиндуцированных напряжений, возникающих в процессе лазерного воздействия.

**Оборудование и материалы.** В качестве образцов использовались многослойные диэлектрические зеркала, нанесенные на поглощающую подложку из SiC. Материалы покрытий:  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  для первого и  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  — для второго образца. Коэффициент отражения зеркала на рабочей длине волны (1064 нм) составлял 99,9 %.

Перед измерением лучевой прочности проведена оценка качества оптической поверхности подложки и изготовленных зеркал (некачественная полировка и наличие макро- и микродефектов ведут к снижению лучевой прочности оптического элемента) [3]. Шероховатость поверхности подложек из SiC измерялась с помощью профилометра FTS PGI 1240 производства компании Taylor Hobson Ltd; параметры формы поверхности подложек определялись с помощью интерферометра GPI XP/D фирмы Zygo Corporation (табл. 1,  $R_a$  — средняя шероховатость,  $R_q$  — среднеквадратичная шероховатость,  $R_v$  — максимальная глубина впадины

профиля,  $R_t$  — максимальная высота профиля,  $R_z$  — высота по десяти точкам, RMS — среднеквадратичное по всей площади апертуры отклонение волнового фронта от сферы сравнения). Анализ изображений микропор, полученных с помощью микроскопа Номанского, и оценка их количества на наблюдаемой поверхности известной площади образцов дал следующие результаты: плотность микродефектов  $\approx 1 \text{ см}^{-2}$ ; средний размер микродефектов  $\approx 3 \text{ мкм}$ ; площадь поверхности, имеющая дефекты,  $\approx 0,019 \%$ .

Таблица 1

Параметры шероховатости и формы образцов						
Подложка	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	$R_v$ , нм	$R_t$ , нм	$R_z$ , нм	RMS
SiC №1	0,8	1	2,2	7,7	4,3	$1,439 \lambda$
SiC с покрытиями $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$	1	1,6	2,8	2,03	6,2	
SiC №2	0,8	1	2	8,4	4,1	$1,078 \lambda$
SiC с покрытиями $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$	0,8	0,9	1,8	7,2	3,7	

На основе методики, подробно описанной в работе [4], измерена лучевая прочность образцов. С помощью лазерного излучения на образец наносится прямоугольный массив точек. С увеличением номера записываемой строки уровень энергии в лазерном импульсе повышается. Кривая зависимости порога ЛИР определяется исходя из наличия или отсутствия разрушения в области воздействия лазерного импульса. На рис. 1 схематично представлена методика измерения. Схема установки для изучения лучевой стойкости приведена на рис. 2 [4]. Для определения зависимости вероятности лазерно-индуцированного пробоя  $p_{\text{ЛИР}}$  от плотности мощности  $P$  лазерного воздействия на исследуемые образцы, использовался микроскоп, оснащенный CCD-камерой. Поверхность образца фотографировалась с помощью микроскопа, а затем обрабатывалась в разработанной программе R-Lab для обработки изображения поля точек повреждения в результате лазерно-индуцированного пробоя (ЛИР).

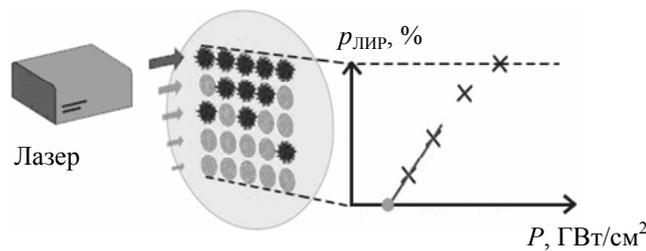


Рис. 1

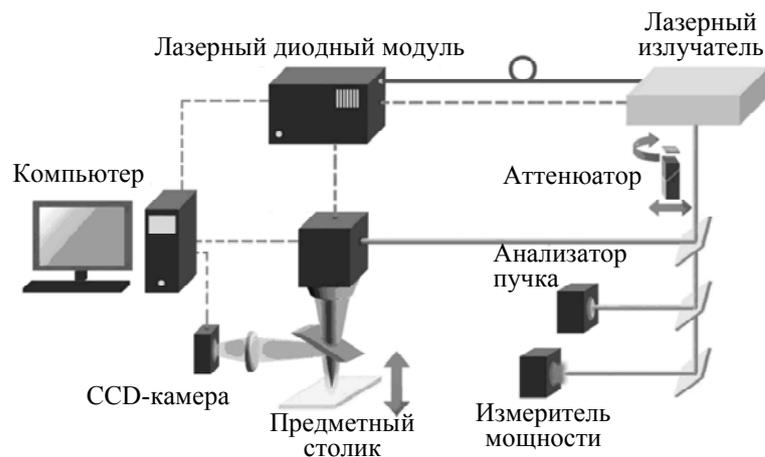


Рис. 2

В цикле экспериментов по определению лучевой прочности диэлектрических покрытий при воздействии лазерного излучения в импульсном режиме использовался излучатель на кристалле ванадата иттрия типа VLC34IR-V2 (основные технические характеристики

приведены в табл. 2 [5]) с продольной диодной накачкой и электрооптической модуляцией добротности.

Таблица 2

**Основные технические данные лазерного излучателя VLC34IR-V2 и волоконного Yb-лазера ILP-05/100/20**

Параметр	VLC34IR-V2	ILP-05/100/20
Активный элемент	Nd:YVO <sub>3</sub>	Yb-стекло
Длина волны генерации, мкм	1,064	1,05—1,07
Максимальная энергия в импульсе $E_{gmax}$ , мДж	1,3	0,5
Максимальная мощность, Вт	2,5	10
Частота повторения импульсов, кГц	≤ 4	20—100
Длительность импульсов, нс	5	160
Размер пятна $2\omega$ по уровню $e^{-2}$ в области воздействия на образец, мкм	24 ± 2	29

Для определения порогов разрушения в условиях, аналогичных воздействию непрерывного ЛИ, использовался волоконный Yb-лазер серии ILP, входящий в состав комплекса для маркировки МиниМаркер М2 (см. табл. 2). Мощность выходного излучения регулировалась только током накачки. Скорость движения 1 мм/с обеспечивала перемещение на расстояние, равное половине диаметра пучка, за 12,5 мс (250 выстрелов при частоте повторения 20 кГц).

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследований лучевой прочности в импульсном и квазинепрерывном режимах ЛИ представлены в табл. 3 (разброс значений лучевой стойкости в импульсном режиме 20 % с учетом данных по различным участкам поверхности исследуемых образцов). Выявлены особенности, которые ведут к снижению измеренного значения лучевой прочности. Режимы воздействия ЛИ: I — многократное воздействие неподвижным пучком в изолированную точку (расстояние между точками фокусировки превышает три диаметра пучка); II — аналогичен режиму I при наличии вибрации или смещения пучка; III — воздействие в окрестности полученной ранее поврежденной области (расстояние между точками примерно равно диаметру пучка).

Таблица 3

**Объединенные результаты исследований лучевой прочности образцов**

Образец	Импульсный режим, ГВт/см <sup>2</sup>			Квазинепрерывный режим, КВт/см <sup>2</sup>		
	I	II	III	I	II	III
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> на SiC	3,7	1,5	1,2	> 600	150—180	300—350
Ta <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> на SiC	2,7	0,8	0,8	500—600	130—360	120—200
Поверхность SiC	0,09	0,06	0,06	150±10	150±10	140±10

Следует отметить принципиальную особенность механизма разрушения оптического элемента, характерную для режима III. При повреждении оптических покрытий под действием лазерного излучения материал подложки может выноситься на поверхность образца, вследствие высокого коэффициента поглощения резко снижаются пороги ЛИР в близлежащих областях поля сканирования. Данный эффект приводит к снижению порогов ЛИР и более выраженной зависимости вероятности пробоя от энергии в импульсе. Данная информация важна для определения порогов ЛИР, особенно в случае многократного воздействия лазерного излучения на точку.

Сравнение результатов эксперимента для режимов I и II показало, что при наличии вибраций и микросмещений пучка относительно образца в поперечном направлении порог разрушения оптического покрытия уменьшается в 2—3 раза. Поскольку смещение области воздействия ЛИ приводит к перераспределению наведенных напряжений в образце и температурного поля, можно предположить, что наблюдаемое снижение порога ЛИР связано с возникающими при смещении пучка градиентами термоиндуцированных напряжений и распределения температуры.

Для изучения динамики наводимых тепловых полей и соответствующих термоиндуцированных напряжений проведено моделирование динамики лазерного нагрева образца при микросмещениях лазерного пучка.

Приведем уравнение, описывающее тепловой источник, и уравнение теплопроводности [7]:

$$\rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \Delta(k \nabla T) + Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

$$Q(x, y, z, t) = I(x, y, t)(1 - R) \exp(-\alpha z). \quad (2)$$

Динамика термоиндуцированных напряжений рассчитываются с помощью уравнения [8]:

$$\frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} - \frac{\rho}{1 + \nu} \frac{E}{\left(1 + \frac{\nu}{1 - 2\nu}\right)} \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial t^2} = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} a \rho \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Здесь  $I_0$  — интенсивность падающего ЛИ, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  — радиус пучка, мкм;  $\vartheta$  — скорость передвижения ЛИ, м/с;  $\tau$  — длительность импульса, нс;  $E$  — модуль Юнга, ГПа;  $\beta$  — коэффициент линейного расширения, K<sup>-1</sup>;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $R$  — показатель отражения зеркала;  $\alpha$  — показатель поглощения, см<sup>-1</sup>.

Заданные в модели параметры пучка, пространственного распределения и энергии соответствовали экспериментальным. Мы приняли следующие упрощения: теплофизические параметры не зависят от температуры; потери тепла вследствие переизлучения не учитываются; между слоями установлен идеальный тепловой контакт; пористость покрытий не учитывается. Начальные и граничные условия модели следующие: начальная температура системы  $T_0 = 25$  °С; источник тепла задан в соответствии с уравнением (1), описывающим поглощение ЛИ в подложке образца; на границах образца установлены граничные условия третьего рода, описывающее теплообмен с окружающей средой (естественная конвекция). Геометрические размеры модели соответствовали образцу (диаметр 50 мм, толщина 0,35 мм). Расчетная сетка задавалась неравномерной в соответствии с распределением поглощенного лазерного излучения, т.е. более плотной в области воздействия ЛИ в центре образца и более разреженной к периферии. Свойства материалов приведены в табл. 4 [2, 3, 9—17].

Результаты моделирования (режим II) и полученные напряжения представлены на рис. 3. Приведены распределения температуры  $T$  (пунктир) и напряжений  $S$  (сплошная кривая). Предварительный нагрев производился в течение 5 с, наведенные тепловые поля и напряжения представлены для момента времени 160 нс после воздействия импульса ( $a$  — установившееся тепловое поле;  $b$  — без смещения;  $v$  — смещение на 1,  $z$  — на 2,  $d$  — на 2,5 диаметра). Расчет проводился в несколько этапов. На первом этапе рассчитывались распределения температуры и напряжений, установившиеся в результате воздействия неподвижного лазерного пучка (рис. 3,  $a$ ). Как видно из рисунка, форма распределения напряжений в этом случае соответствует распределению амплитуды температурного профиля.

На втором этапе рассчитывалась динамика температурного поля и термоиндуцированных напряжений, возникающих в образце на границе подложки с покрытиями, непосредственно после воздействия лазерного импульса. Моделирование показало, что напряжения, возникающие в течение десятков-сотен наносекунд после воздействия импульса, являются отрицательными и лишь впоследствии, в течение сотен наносекунд-единиц микросекунд, перераспределение напряжений приводит к формированию профиля, соответствующего распределению температуры. Максимальная по модулю амплитуда „отрицательных“ наведенных напряжений соответствует временному промежутку  $\approx 160$  нс после окончания воздействия импульса. Соответствующие распределения приведены на рис. 3,  $b-d$ .

В случае нулевого смещения пучка наложение динамической отрицательной составляющей напряжений и положительных напряжений, предварительно наведенных неподвижным пучком, приводит к их взаимной компенсации и уменьшению максимального по модулю значения напряжений. Однако при ненулевом смещении (рис. 3, в—д) непосредственно после воздействия импульса возникает дополнительная отрицательная составляющая напряжений, что может приводить к увеличению градиента и максимального перепада наведенных напряжений. Для заданных параметров моделирования критическое значение смещения, соответствующие максимальному градиенту наведенных напряжений, составляет примерно 1 диаметр лазерного пучка.

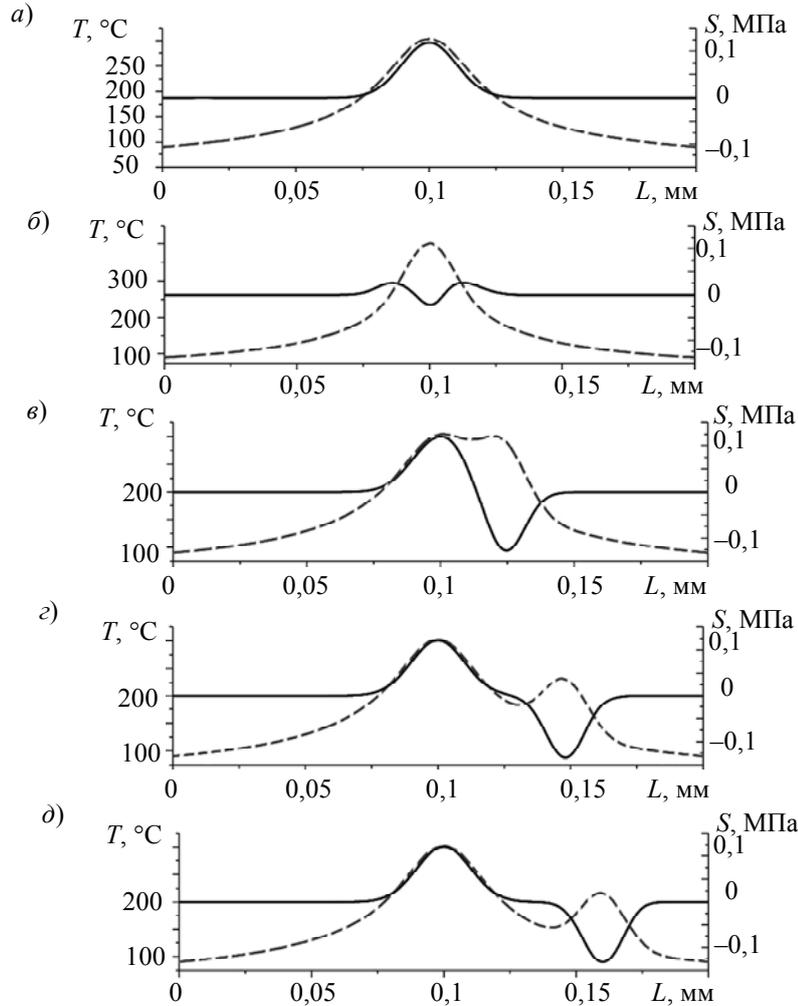


Рис. 3

**Заключение.** Таким образом, в работе показано, что пороги ЛИР оптических покрытий, нанесенных на поглощающую подложку, существенно зависят от условий, в которых находится участок оптической поверхности при воздействии излучения.

При поглощении части проникающего в подложку лазерного излучения (после разрушения отражающего покрытия) карбид кремния в поле плазменного факела может распыляться на прилегающую к области пробоя поверхность. Вследствие появления на поверхности покрытия подложки поглощающих частиц лучевая стойкость соседних областей нанесенного диэлектрического покрытия снижается, при этом уменьшается дисперсия измеренного порога ЛИР при плотном расположении соседних областей фокусировки лазерного пучка.

Наличие микросмещений лазерного пучка или образца в результате перемещения или механической вибрации приводит к существенному (до 2—3 раз) снижению порогов ЛИР. Результаты моделирования динамики нагрева образца при наличии микросмещений пучка

показали, что в случае смещения пучка на расстояние, примерно равное диаметру пятна, существенно возрастает градиент наведенных напряжений. Возникающие напряжения в области воздействия лазерного излучения могут приводить также к снижению коэффициента отражения диэлектрического зеркала, что, в свою очередь, приведет к еще большему нагреву в области воздействия и соответственно снижению порога лазерно-индуцированного разрушения.

Рассмотренные особенности представляют интерес также с точки зрения изучения особенностей и порогов ЛИР в объемных брэгговских отражающих решетках [18, 19].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matson L. E. and Mollenhauer D.* Advanced materials and processes for large, lightweight, space-based mirrors // 2003 IEEE Aerospace Conference Proc. (Cat. No.03TH8652). 2003. Vol. 4. P. 4\_1681—4\_1697.
2. *Larruquert J. I., Pérez-Marín A. P., García-Cortés S., Rodríguez-de Marcos L., Aznárez J. A., and Méndez J. A.* Self-consistent optical constants of SiC thin films // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2011. Vol. 28, N 11. P. 2340.
3. *Glebov L. B.* Intrinsic laser-induced breakdown of silicate glasses // *Laser-Induced Damage in Optical Materials.* 2002. Vol. 4679. P. 321—331.
4. *Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Сергеев А. Н., Пузык М. В.* Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2012. Т. 55, № 7. С. 80—85.
5. *Гагарский С. В., Приходько К. В.* Мощный наносекундный эрбиевый лазер с диодной накачкой // Тез. докл. XXXVI науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ), 2007.
6. *Тогатов В. В., Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Черевко Ю. И.* Импульсный блок питания лазерных диодных модулей для накачки твердотельных лазеров // *Приборы и техника эксперимента.* 2007. Т. 2. С. 158—159.
7. *Liu J., Lu J., Ni X., Dai G., and Zhang L.* Thermal stress cleaving of silicon wafer by pulsed Nd:YAG laser // *Chinese Opt. Lett.* 2010. Vol. 8, N 8. P. 1000—1003.
8. *Карташов Э. М., Ремизова О. И.* Модельные представления термического удара при импульсных и пульсирующих тепловых нагрузках на основе обобщенного уравнения энергии // *Матем. моделирование.* 2005. Т. 17, № 4. С. 81—95.
9. *Wood D. L., Nassau K., Kometani T. Y., and Nash D. L.* Optical properties of cubic hafnia stabilized with yttria // *Appl. Opt.* 1990. Vol. 29, N 4. P. 604.
10. *Natoli J.-Y., Gallais L., Akhouayri H., and Amra C.* Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms // *Appl. Opt.* 2002. Vol. 41, N 16. P. 3156.
11. *Hinz M., Marti O., Gotsmann B., Lantz M. A., and Dürig U.* High resolution vacuum scanning thermal microscopy of HfO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. P. 043122-1—043122-3.
12. *Crooks D. R. M. et al.* Experimental measurements of mechanical dissipation associated with dielectric coatings formed using SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Class. Quantum Grav.* 2006. Vol. 23. P. 4953—4965.
13. *Dole S. L., Hunter O., and Wooge C. J.* Elastic Properties of Monoclinic Hafnium Oxide at Room Temperature // *J. Am. Ceram. Soc.* 1977. Vol. 60, N 11—12. P. 488—490.
14. *Papernov S., Schmid A. W., Oliver J. B., and Rigatti A. L.* Damage thresholds and morphology of the front- and back-irradiated SiO<sub>2</sub> thin films containing gold nanoparticles as artificial absorbing defects // *Proc. SPIE.* 2007. Vol. 6720. P. 67200G.
15. *Curtis C. E., Doney L. M., and Johnson J. R.* Some Properties of Hafnium Oxide, Hafnium Silicate, Calcium Hafnate, and Hafnium Carbide // *J. Am. Ceram. Soc.* 1954. Vol. 37, N 10. P. 458—465.
16. *Gao L., Lemarchand F., and Lequime M.* Refractive index determination of SiO<sub>2</sub> layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs // *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.* 2013. Vol. 8, Jan. P. 13 010.
17. *Gao L., Lemarchand F., and Lequime M.* Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering // *Opt. Express.* 2012. Vol. 20, N 14. P. 15734.

18. Glebov L. Volume Holographic Elements for Spectroscopy and Laser Applications. CREOL the College of Optics and Photonics University of Central Florida, Orlando, FL, 10 March 2016. [Электронный ресурс]: <<https://www.creol.ucf.edu/Partnerships/Affiliates/2016Symposium/Presentations/LeonGlebov.pdf>>.
19. Venus G. B., Seviran A., Smirnov V., and Glebov L. B. High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5711. P. 166—176.

#### Сведения об авторах

- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: vkhramov@gmail.com
- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Андрей Николаевич Сергеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: mg\_phoenix@yahoo.com
- Радик Минзагитович Ахмадуллин** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: 79217973065@yandex.ru

Поступила в редакцию  
13.11.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Храмов В. Ю., Гагарский С. В., Сергеев А. Н., Ахмадуллин Р. М. Лучевая прочность нанесенных на поглощающую подложку диэлектрических отражающих покрытий // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 142—149.

### LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLD OF REFLECTIVE DIELECTRIC COATINGS ON ABSORBING SUBSTRATE

V. Yu. Khramov, S. V. Gagarsky, A. N. Sergeev, R. M. Akhmadullin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: mg\_phoenix@yahoo.com

Several features of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> coatings deposited on absorbing substrate of single-crystal silicon carbide (SiC) are revealed to cause a decrease in their laser-induced damage threshold. It has been experimentally shown that in the presence of transverse micro displacement of the beam during the measurements, the radiation strength of the sample decreases in 2–3 times. Using the heat transfer equation and the finite element method in the CAE (computer-aided engineering) system, the effects of laser radiation with transverse beam displacement is simulated, and the dynamics of temperature changes and induced thermal stresses inside the samples are evaluated.

**Keywords:** laser induced damage of reflecting mirrors, dielectric coatings, absorbing substrate, laser induced damage threshold, monocrystalline silicon carbide, thermal stress

#### REFERENCES

- Matson L.E. and Mollenhauer D. 2003 *IEEE Aerospace Conference Proceedings* (Cat. No.03TH8652), 2003, vol. 4, pp. 4\_1681-4\_1697.
- Larruquert J.I., Pérez-Marín A.P., García-Cortés S., Rodríguez-de Marcos L., Aznárez J.A., and Méndez J.A. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, no. 11(28), pp. 2340.
- Glebov L.B. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2002, vol. 4679, pp. 321–331.
- Gagarskiy S.V., Ermolayev V.S., Sergeyev A.N., Puzyk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 7(55), pp. 80–85. (in Russ.)
- Gagarskiy C.V., Prikhod'ko K.V. *Tez. XXXVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava SPbGITMO(TU)* (Theses of the XXXVI Scientific and Technical Conference of the Faculty of SPbGITMO(TU)), 2007. (in Russ.)
- Togatov V.V., Gagarskiy S.B., Gnatyuk P.A., Cherevko Yu.I. *Instruments and Experimental Techniques*, 2007, no. 2, pp. 158–159. (in Russ.)
- Liu J., Lu J., Ni X., Dai G., Zhang L. *Chinese Opt. Lett.*, 2010, no. 8(8), pp. 1000–1003.
- Kartashov É.M., Remizova O.I. *Matematicheskoe Modelirovanie (Mathematical Models and Computer Simulations)*, 2005, no. 4(17), pp. 81–95. (in Russ.)
- Wood D. L., Nassau K., Kometani T.Y., and Nash D.L. *Appl. Opt.*, 1990, no. 4(29), pp. 604.
- Natoli J.-Y., Gallais L., Akhouayri H., and Amra C. *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, no. 16, p. 3156.
- Hinz M., Marti O., Gotsmann B., Lantz M.A., and Dürig U. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, pp. 043122-1–043122-3.
- Crooks D.R.M. et al. *Class. Quantum Grav.*, 2006, vol. 23, pp. 4953–4965.
- Dole S.L., Hunter O., and Wooge C.J. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1977, no. 11–12(60), pp. 488–490.

14. Papernov S., Schmid A.W., Oliver J.B., and Rigatti A.L. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6720, p. 67200G.
15. Curtis C.E., Doney L.M., and Johnson J.R. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1954, no. 10(37), pp. 458–465.
16. Gao L., Lemarchand F., and Lequime M. *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.*, 2013, vol. 8, pp. 13010.
17. Gao L., Lemarchand F., and Lequime M. *Opt. Express*, 2012, no. 14(20), pp. 15734.
18. Glebov L. *Volume Holographic Elements for Spectroscopy and Laser Applications*, CREOL the College of Optics and Photonics University of Central Florida, March 10, 2016 Orlando, FL". <https://www.creol.ucf.edu/Partnerships/Affiliates/2016Symposium/Presentations/LeonGlebov.pdf>.
19. Venus G.B., Sevian A., Smirnov V., and Glebov L.B. *SPIE*, 2005, vol. 5711, pp. 166–176.

**Data on authors**

- Valery Yu. Khramov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: vkhramov@gmail.com
- Sergey V. Gagarsky** — PhD; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Andrey N. Sergeev** — PhD; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: mg\_phoenix@yahoo.com
- Radik M. Akhmadullin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: 79217973065@yandex.ru

**For citation:** Khramov V. Yu., Gagarsky S. V., Sergeev A. N., Akhmadullin R. M. Laser-induced damage threshold of reflective dielectric coatings on absorbing substrate. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 142—149 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-142-149