

## Повреждение запыленных оптических элементов в поле непрерывного лазерного излучения

И. Н. Деркач, Е. А. Кудряшов, Г. Н. Качалин, Н. А. Кирдяев, В. В. Ладейщикова, Д. С. Тимаев<sup>1)</sup>

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 607190 Саров, Россия

Поступила в редакцию 6 августа 2018 г.

Приведены результаты экспериментов и численного моделирования по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на оптические элементы, при котором наблюдалось повреждение образца. С использованием, разработанного в ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» программного комплекса «ЛОГОС» проведено численное моделирование процессов по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на запыленные оптические элементы, при котором наблюдалось повреждение образца.

DOI: 10.1134/S0370274X18180078

**1. Введение.** Поведение частиц пыли в поле мощного лазерного излучения представляет большой научный и практический интерес, так как при нагреве частиц до высокой температуры в сотни и тысячи градусов появляется возможность для интенсивного протекания различных физико-химических процессов.

В работах [1, 2] исследовался лазерный нагрев частиц различной химической природы, нанесенных на зеркальную подложку из слоев оксидов кремния и оксидов металлов, находящихся в воздушной сре-

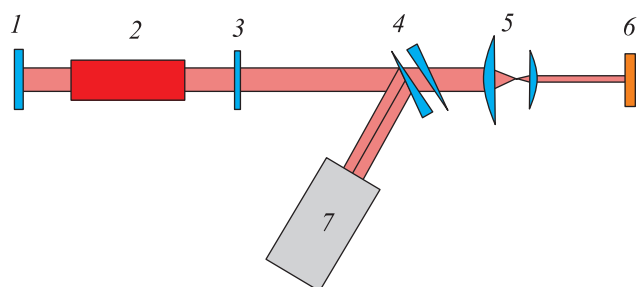


Рис. 1. (Цветной онлайн) Принципиальная схема экспериментального стенда по исследованиям воздействия лазерного излучения на оптические элементы: 1, 3 – торцевое зеркало резонатора; 2 – активная среда лазера с источником накачки; 4 – два клина установленные в положении компенсации углового увода оптической оси лазерного излучения; 5 – перестраивающая оптическая система; 6 – исследуемый оптический элемент; 7 – система измерения параметров лазерного излучения

де. В этих работах описаны физические процессы, протекающие при взаимодействии непрерывного лазерного излучения с частицами, абсорбированными на малопоглощающей оптической поверхности.

В данной работе проведено исследование влияния наличия частиц пыли на поверхности оптического элемента в поле непрерывного лазерного излучения. Такой экспериментальный подход показал, что в этих условиях высокотемпературный нагрев частицы, находящейся в контакте с поверхностью кварца приводит к повреждению поверхности образца с образованием глубокого кратера, центр которого совпадает с центром частицы.

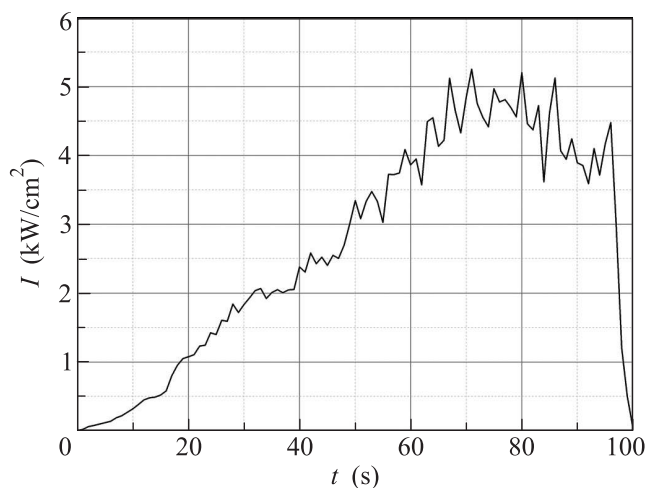


Рис. 2. Зависимость интенсивности лазерного излучения на образце от времени

**2. Эксперимент. 2.1. Экспериментальная установка.** Экспериментальные исследования по воздействию непрерывного лазерного излучения ближнего

<sup>1)</sup>e-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

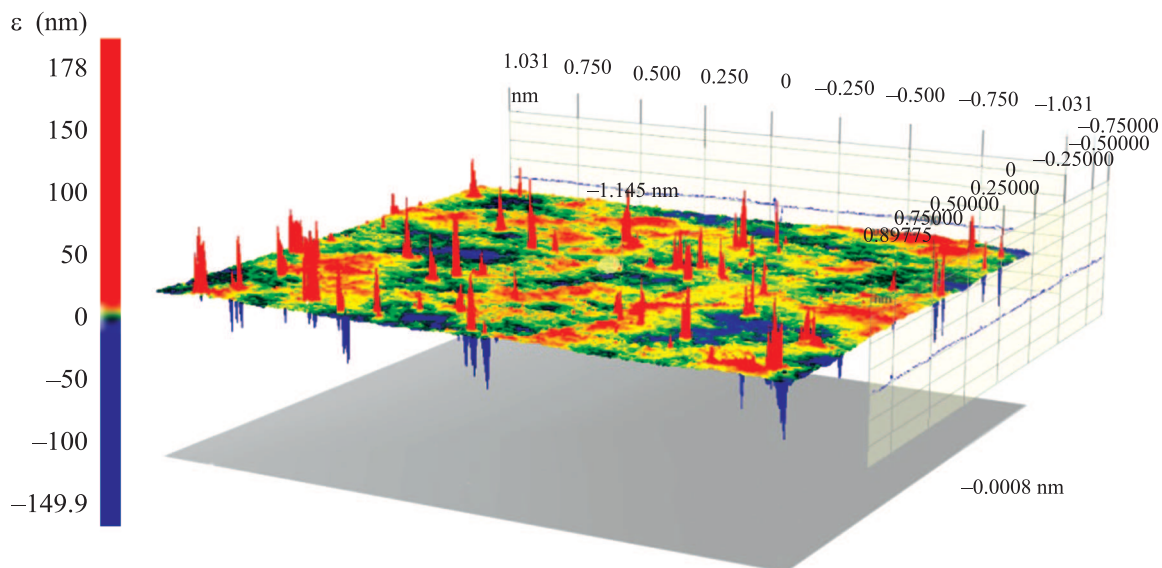


Рис. 3. (Цветной онлайн) Профиль участка поверхности ОЭ до воздействия

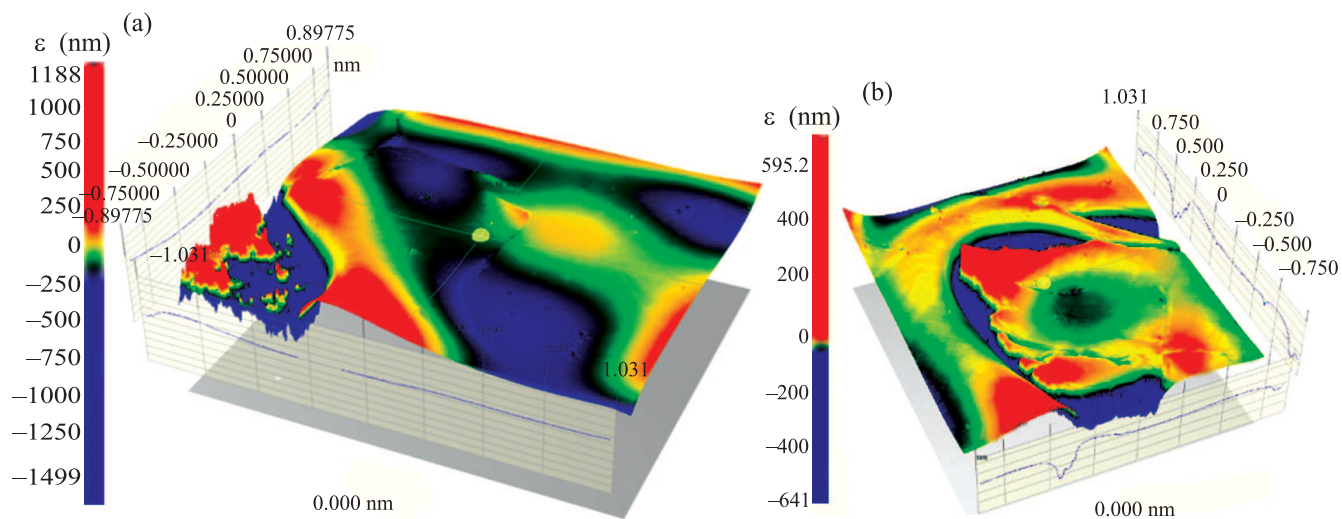


Рис. 4. (Цветной онлайн) Профиль участка поверхности ОЭ после воздействия. (а) – Минимальные повреждения. (б) – Максимальные повреждения

ИК (инфракрасного) диапазона на оптические элементы были проведены на экспериментальном стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Стенд включал в себя: кювету лазера с источником накачки, систему формирования излучения генерации (резонатор), систему измерения параметров лазерного излучения, оптическую систему формирования пространственных и угловых характеристик лазерного излучения на исследуемом оптическом элементе.

Для поддержания уровня выходной мощности лазерного излучения на постоянном уровне торцевое зеркало резонатора устанавливалось

в оправу корректора наклонов заднего зеркала резонатора, управляемого по заданному алгоритму для поддержания максимума мощности [3, 4].

На систему измерения выходных параметров генерации лазерного излучения часть излучения отводилась кварцевым клином. Для компенсации углового увода луча в оптическую схему устанавливался дополнительный клин, с разворотом на угол 180° градусов относительно оси лазерного излучения. Обе грани второго клина были просветлены на длину волны лазерного излучения. По результатам измерений отражение от просветленной поверхности не превышало 0.2%.

Измерение мощности генерации проводилось с помощью термоэлектрического измерителя мощности OPHIR FL500A с воздушным охлаждением и точностью измерения  $\pm 3\%$ .

В эксперименте в качестве оптического элемента выбрана пластина из кварца КУ (ГОСТ 15130-86) диаметром 50 мм и толщиной 16 мм.

Зависимость интенсивности излучения на оптическом элементе от времени представлена на рис. 2. Время облучения составляло  $t \approx 100$  с.

**1.2. Результаты эксперимента.** В результате проведения экспериментов были получены следующие результаты, представленные на рис. 3–5. На рис. 3, 4 приведены изображения, полученные на профилометре NanoScan Sq с областью захвата  $S = 1 \times 1$  мм. На рисунке 5 приведена фотография области повреждения образца.

Из рисунка 4 видны характерные размеры повреждений и их форма. Из рисунка 5 следует, что форма

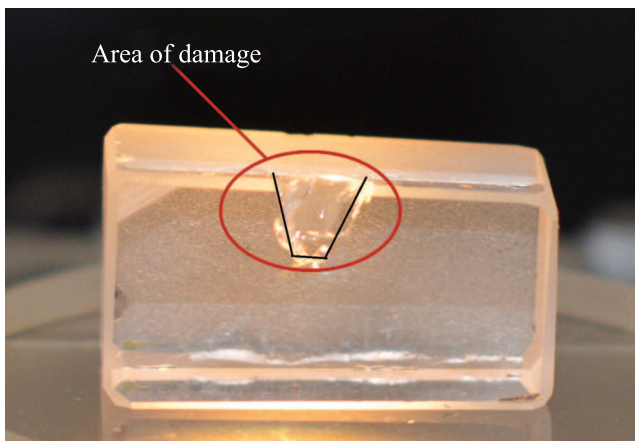


Рис. 5. (Цветной онлайн) Характер повреждения ОЭ

повреждения оптического элемента (ОЭ) представляет собой усеченный конус. Было выдвинуто предположение, что такой характер повреждения мог быть получен из-за попадания пыли на поверхность ОЭ с возможным размером  $d \approx 10\text{--}200$  мкм. Для проверки предположения была использована расчетная модель, позволяющая описывать взаимодействие лазерного излучения с поверхностью ОЭ.

**3. Численное моделирование.** **3.1. Постановка задачи и расчетная модель.** Исходя из условий эксперимента, модельный запыленный оптический элемент, через который проходило непрерывное лазерное излучение, представлял собой диск с плоскостями торцами, изготовленный из кварца с малым коэффициентом поглощения. На рисунке 6

представлена геометрия задачи и фрагмент расчетной сетки.

Кварцевая подложка имела радиус  $R = 25$  мм и толщину  $L = 16$  мм. В расчетах использовались теплофизические характеристики плавленого кварца, приведенные в [5]. Частица моделировалась диском заданного радиуса. Такая постановка была принята для упрощения построения расчетной модели и соответствующей ей сетки. Частица располагалась в центре кварцевой подложки. Возможные размеры частиц, остающихся после очистки, или попавших случайным образом, составляют порядка от 10 до 200 мкм. Величину  $q$  в рамках расчета варьировали в пределах от 1 до 10 кВт/см<sup>2</sup>. Считалось, что частица полностью поглощает падающий на нее тепловой поток. Время воздействия составляло  $t = 100$  с.

**3.2. Расчет для отдельной микрочастицы.** Как говорилось ранее, частица моделировалась в виде бесконечно тонкого диска с известным радиусом. Для моделирования были выбраны радиусы  $r_{\text{part}} = 50, 75, 100, 150$  и  $200$  мкм. В рамках задачи считалось, что коэффициент поглощения такой микрочастицы равен 1. Соответственно, на область частицы накладывалось граничное условие (2 рода) – тепловой поток. Были смоделированы следующие значения плотности мощности лазерного излучения от 1 до 10 кВт/см<sup>2</sup>. Когда значение температуры на границе частицы достигает значения температуры плавления (критический поток для данного размера частицы), область, где коэффициент поглощения равен единице, начинает расширяться, т.е. площадь падения теплового потока увеличивается. Чтобы учесть данный факт в рамках нашего расчета, на область за вычетом частицы нашего образца было задано граничное условие тепловой поток в виде следующей формулы:

$$\text{If}(T > T_{pl}), \text{ then } q_f = q, \text{ else } q_f = 0, \quad (2)$$

где  $T_{pl}$  – температура плавления кварца,  $q$  – плотность теплового потока. Данная формула представляет собой условную конструкцию if, т.е. если  $(T > T_{pl})$  величина теплового потока равна  $q$ , а иначе 0.

Данное условие на каждом расчетном шаге проверяет значение температуры в центре ячейки. И как только значение больше указанного, тепловой поток будет падать на область  $r_{\text{part}} + 1$  ячейка, и так далее. Необходимо заметить, что в расчете также учитывалось объемное поглощение лазерного излучения, так как стекло не может полностью пропускать излучение. Данное условие накладывалось на область па-

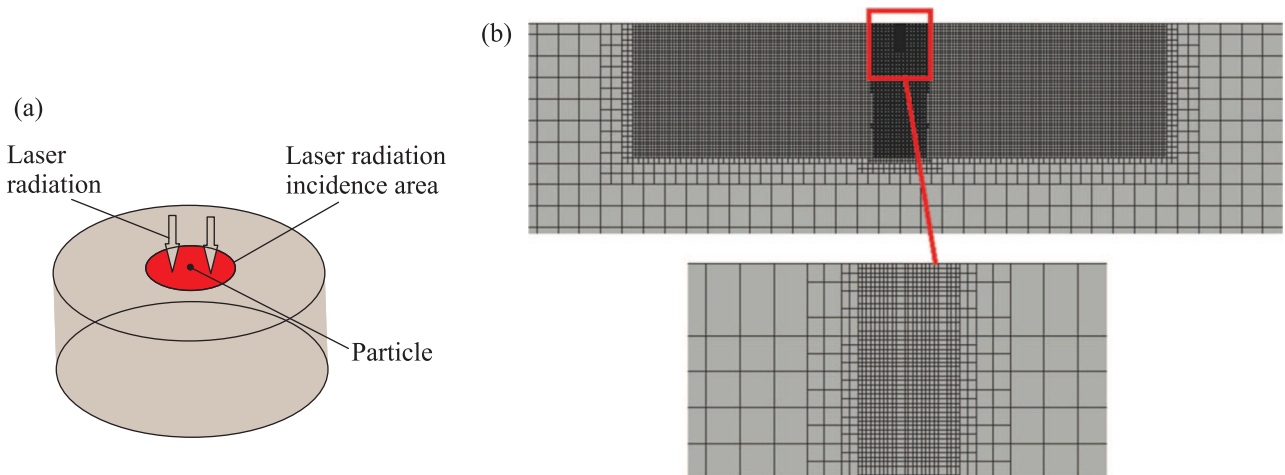


Рис. 6. (Цветной онлайн) Геометрическая модель исследуемого образца (а) и фрагмент расчетной сетки (б)

дения потока при  $r_{part} < r < 2$  см при помощи формулы:

$$\text{If } (r_{part} < r < 0.02), \text{ then } Q_v = Q, \text{ else } Q_v = 0, \quad (3)$$

где  $Q$  – объемный источник энергосвечения. Данная формула представляет собой условную конструкцию if, т.е. если  $(0.00005 < r < 0.02)$ , величина объемного источника равна  $Q$ , а иначе 0.

Область частицы исключалась в силу того, что учитывалось условие объемного поглощения. Все расчеты проводились с использованием программного комплекса “ЛОГОС” [6].

В случае, когда на частицу падает критический для текущего размера поток, площадь области с коэффициентом поверхностного поглощения больше 0 начинает постепенно увеличиваться. Вследствие этого растет температура, и значение достигает порядка  $T_{pl}$ , а затем и  $T_{sat}$ . Тогда ОЭ начинает разрушаться. На данный момент в программе реализован лишь один последовательный фазовый переход, поэтому был реализован процесс сублимации кварцевого стекла. Но можно смоделировать процесс плавления искусственным образом, задав свойства кварца в зависимости от температуры в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{If } (T \leq T_{pl}), \text{ then } C(\lambda) &= C_{s.ph.}(\lambda_{liq.ph.}), \\ \text{else } C(\lambda) &= C_{liq.ph.}(\lambda_{liq.ph.}), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $T_{pl}$  – температура плавления кварца,  $C_{s.ph.}(\lambda_{s.ph.})$  – теплофизические свойства кристаллической фазы,  $C_{liq.ph.}(\lambda_{liq.ph.})$  – теплофизические свойства жидкой фазы. Данная формула представляет собой условную конструкцию if, т.е. если  $(T \leq T_{pl})$ , используются теплофизические свойства твердой фазы кварца, а иначе жидкой.

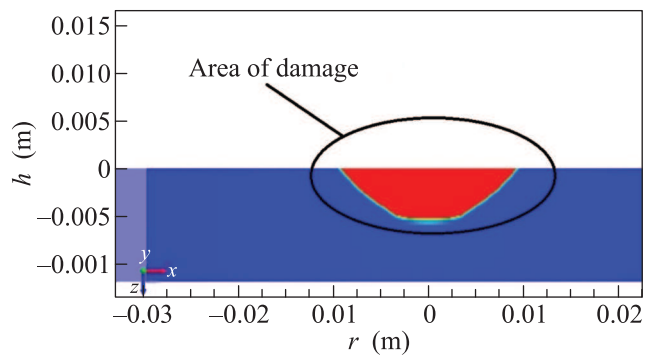


Рис. 7. (Цветной онлайн) Характер повреждения ОЭ в сечении плоскостью XZ при  $r_m = 50$  мкм,  $q = 8$  кВт/см<sup>2</sup> на момент времени 24.7 с

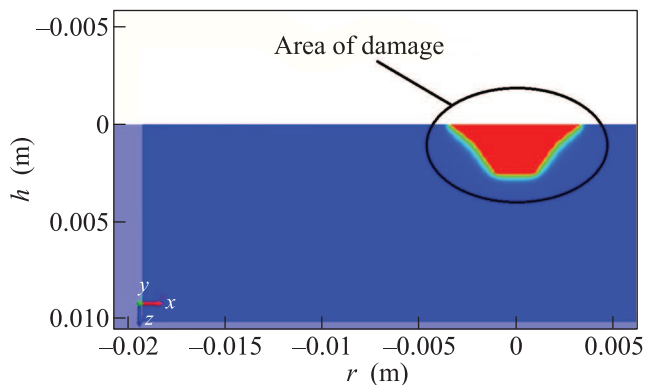


Рис. 8. (Цветной онлайн) Характер повреждения ОЭ в сечении плоскостью XZ при  $r_m = 75$  мкм,  $q = 5$  кВт/см<sup>2</sup> на момент времени 27.6 с

Чтобы смоделировать тот факт, что при фазовом переходе часть сетки как бы улетучивается в виде газа, в параметрах фазового перехода задава-

вался коэффициент теплопроводности стремящимся к бесконечности, а коэффициент теплоемкости стремящимся к нулю. Температура фазового перехода  $T_{t.ph} = 4500$  К, удельная теплота фазового перехода  $\mu = 1750$  кДж/кг. Были рассмотрены различные варианты размера частицы и значений плотности мощности теплового потока. Были получены следующие результаты, представленные на рис. 7–9.

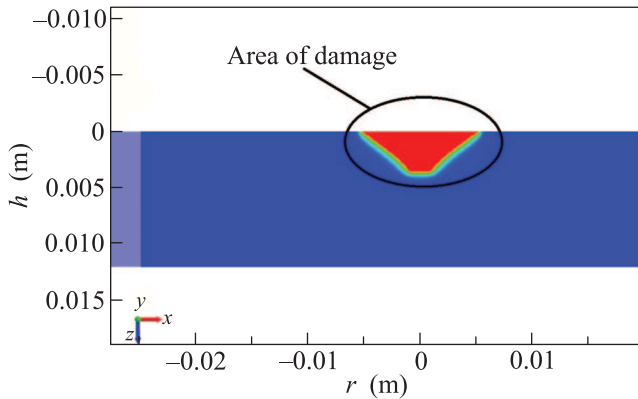


Рис. 9. (Цветной онлайн) Характер повреждения ОЭ в сечении плоскостью  $XZ$  при  $r_m = 150$  мкм,  $q = 3$  кВт/см<sup>2</sup> на момент времени 2.5 с

Из рисунков 8–9 видно, что происходит повреждение исследуемого образца, а именно проплавление. Для различных входных параметров  $r_{part}$ ,  $q$  характер проплавленной области схож, и представляет собой усеченный конус, что хорошо согласуется с картиной, наблюдаемой в эксперименте. Данный расчет

показал, что даже небольшого размера частица способна привести к необратимым повреждениям ОЭ при прохождении через него лазерного излучения.

**4. Заключение.** С использованием программного комплекса “ЛОГОС” рассчитаны поля температур для различных размеров частиц и значений плотности мощности лазерного излучения.

Характер повреждения ОЭ в эксперименте хорошо согласуется с расчетным и представляет собой усеченный конус, что указывает на разумную точность расчетов.

Полученные результаты могут служить дополнением при разработке нормативных документов, устанавливающих допустимую величину и концентрацию пыли на поверхностях оптических элементов, работающих в системах непрерывных лазеров.

1. A. Brown, A. Oglosa, and L. Taylor, *Appl. Opt.* **54**(16), 5216 (2015).
2. A. Brown, A. Oglosa, and K. Olson, *Optics & Laser Technology*. **89**, 27 (2017).
3. S. Garanin, S. Khokhlov, A. Manachinsky, and F. Starikov, *Advances in Science and Technology*, Trans Tech Publications, Switzerland (2013), v. 82, p. 75.
4. С. Г. Гаранин, А. Н. Маначинский, Ф. А. Стариков, С. В. Хохлов, *Автометрия* **48**(2), 30 (2012).
5. М. А. Михеев, И. М. Михеева, *Основы теплопередачи*, Энергия, М. (1967).
6. Пакет программ “ЛОГОС”, версия 5, свидетельство # 2017612306 от 20.02.2017.