

Метод оценки оптической прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции

В. Е. ПРИВАЛОВ¹, В. Г. ШЕМАНИН², О. В. МКРТЫЧЕВ³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vaevpriv@yandex.ru

²Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

³Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, филиал в г. Новороссийске, Россия

Предложена методика измерения оптической прочности поверхности вещества, облучаемого мощным импульсным лазерным излучением. Методика измерения основана на использовании однопараметрического статистического распределения Вейбулла–Гнеденко. Создана установка, с помощью которой реализуется данная методика. С использованием данной методики измерена оптическая прочность многослойных наноразмерных покрытий.

Ключевые слова: лучевая прочность, измерение энергии излучения, лазерная абляция, распределение Вейбулла–Гнеденко.

The method of measuring the optical resistance of the surface irradiated by high-power pulsed laser radiation using a one-parameter Weibull-Gnedenko statistical distribution is proposed. The device is assembled on the basis of standard equipment, which allows measuring the optical strength of the irradiated surface. On the basis of the proposed method of measuring, measurements of the optical strength of multilayer nanoscale coatings were made.

Key words: radiation resistance, measurement of radiation energy, laser ablation, the Weibull–Gnedenko's distribution.

Явления, связанные с взаимодействием лазерного излучения с веществом, изучаются многими исследователями в различных областях знания [1–7]. При облучении поверхности раздела двух сред мощным импульсным лазерным излучением происходит её механическое разрушение. В таких условиях приборы работают неточно или их невозможно применить. В частности, данная проблема возникает при лазерном абляционном разрушении оптических элементов силовой оптики. С данной проблемой приходится сталкиваться в нанофотонике и оптоэлектронике при применении тонкоплёночных покрытий, нанокompозитных и оптических материалов, стёкол, в оптоволоконной технике и во многих других областях науки и техники [4, 7–9]. Определение оптической прочности поверхностей деталей рассмотрено в работах [5, 8]. Рассмотренные в указанных работах способы или не отличаются высокой точностью, или не позволяют исключить зависимость оптической прочности от размера пятна облучения поверхности. В связи с этим прогнозирование оптической прочности поверхности материалов силовой оптики и оценка надёжности работы оптического элемента в заданных условиях облучения является актуальной задачей.

Цель данной работы – разработка метода прогнозирования оптической прочности поверхности материалов, основанного на распределении Вейбулла–Гнеденко (в англоязычной литературе это распределение называется распределением Вейбулла).

В данной статье описан результат многолетних теоретических и экспериментальных исследований прочности материалов (стёкол, кристаллов, волоконно-оптических элементов и т. п.), проведённых авторами для учёта влияния различных физических факторов на оптическую прочность [5, 6, 8]. Рассмотрены метод точного определения прочностных свойств оптических материа-

лов и возможность прогнозирования надёжности работы оптических материалов в условиях мощного импульсного облучения.

Различают три вида оптической прочности: термоупругое растрескивание, пробой в поле световой волны при самофокусировке и разрушение вследствие разогрева микродефектов. Рассмотрим последний вид разрушения с применением статистических методов. При этом полагаем, что прочность поверхности материала значительно уменьшается из-за случайно распределённых на ней микродефектов. Для количественного определения оптической прочности необходимо определить среднее значение прочности x из N измерений при доверительном интервале Δx прочности. Для этого используют функцию распределения прочности в виде

$$f(x) = \Delta N / (N \Delta x),$$

где ΔN – число образцов с прочностью в диапазоне $(x, x + \Delta x)$.

Для анализа прочности хрупких материалов используем модель Вейбулла–Гнеденко, основанную на принципе «наиболее слабого звена», с вероятностью разрушения материала

$$P = 1 - \exp(-Y), \quad (1)$$

где Y – риск разрушения объёма, определяемый как

$$Y = \begin{cases} \int_V ((y - y_{пр}) / y_{норм}) dV, & y > y_{пр}; \\ 0, & y \leq y_{пр}, \end{cases}$$

где V – рассматриваемый объём или площадь поверхности

облучаемого материала; y – нагрузка, приложенная к элементу dV этого объема; $y_{пр}$ – предел прочности; $y_{норм}$ – нормировочный параметр, имеющий размерность (единица напряжения, умноженная на единицу объема в степени $1/m$); m – модуль Вейбулла, также называемый параметром формы распределения.

Цель данной статьи – определение оптической прочности материала с более высокой точностью, простота и надёжность при использовании стандартного оборудования. Поэтому, вместо изучения профиля распределения интенсивности в пучке излучения, было решено учитывать только интегральную характеристику импульса в виде плотности энергии импульса. Для этого предложено в (1) представить интегральную функцию распределения Вейбулла–Гнеденко в виде

$$P_{ВГ}(F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \sum_{j=1}^k (F/F_{0,5})^{m_j} \right\}, & F > 0; \\ 0, & F \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{ВГ}$ – вероятность разрушения материала в модели Вейбулла–Гнеденко; F – плотность энергии падающего излучения; k – общее количество разных видов дефекта; $F_{0,5}$ – пробойная плотность энергии, для которой экспериментальная вероятность пробоя равна $P_{эксп}=0,5$; m_j – модуль Вейбулла для данного j -го вида дефекта. Предполагается, что в однородном материале случайно расположены k типов различных дефектов, которые действуют независимо друг от друга.

Поставленная цель достигается в два этапа. Первый этап – экспериментальный: получение кривой $P_{эксп}(F)$ зависимости вероятности $P_{эксп}$ разрушения облучаемого образца от плотности энергии F импульсного падающего излучения. Второй этап – аналитический: полученная кривая $P_{эксп}(F)$ моделируется кривой $P_{ВГ}(F)$ с помощью статистического распределения Вейбулла–Гнеденко по формуле (2).

Эксперимент. Для проведения этого собрана экспериментальная установка для измерения энергии излучения и изучения статистических закономерностей лазерно-индуцированного разрушения. Структурная схема установки приведена на рис. 1. Каждую точку поверхности исследуемого образца подвергали однократному облучению импульсом излучения с заданной плотностью энергии F_i ($i=1, 2, \dots, n$, где n – это количество значений плотности энергии пучка, которое определяется параметрами системы изменения энергии импульса излучения) и регистрировали возникновение оптического пробоя, индуцированного лазерным излучением. Далее процесс повторяли в другой точке. После проведения цикла измерений из N_i облучений, среди которых произошло N_{pi} разрушений, вычисляют экспериментальное значение вероятности $P_{эксп}(F_i)$

$$P_{эксп} = N_{pi} / N_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где $P_{эксп}$ – экспериментально измеренная вероятность разрушения материала; F_i – заданная в эксперименте плотность энергии падающего излучения; N_{pi} – число зафиксированных

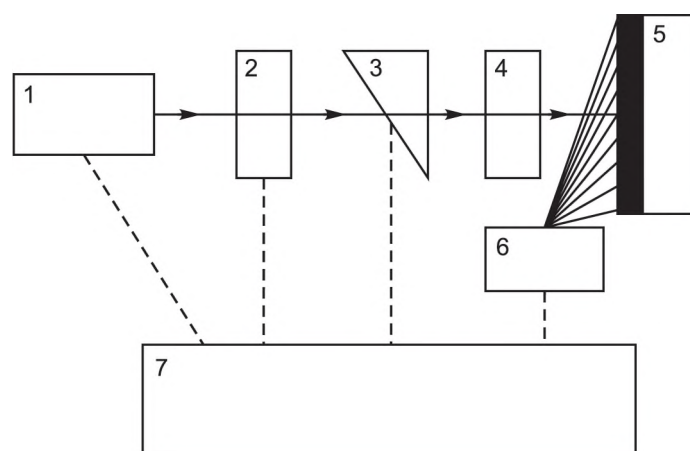


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для измерения энергии излучения и изучения статистических закономерностей лазерно-индуцированного разрушения:

1 – источник лазерного излучения; 2 – система изменения энергии импульса излучения; 3 – система определения энергии импульса излучения; 4 – система фокусировки излучения на переднюю (по отношению к падающему излучению) поверхность исследуемого образца; 5 – исследуемый образец; 6 – система регистрации разрушения поверхности исследуемого образца; 7 – система записи и обработки информации

в эксперименте разрушений при заданном значении F_i ; N_i – общее количество облучений материала в эксперименте при заданном значении F_i .

По полученным точкам $P_{эксп}$ строили кривую вероятности разрушения поверхности образца (рис. 2). Значения из (3) отмечены точками. Значения вероятности вне этих точек вычисляли путём интерполирования. Для примера на рис. 2 показаны результаты линейной и сплайновой интерполяций, в

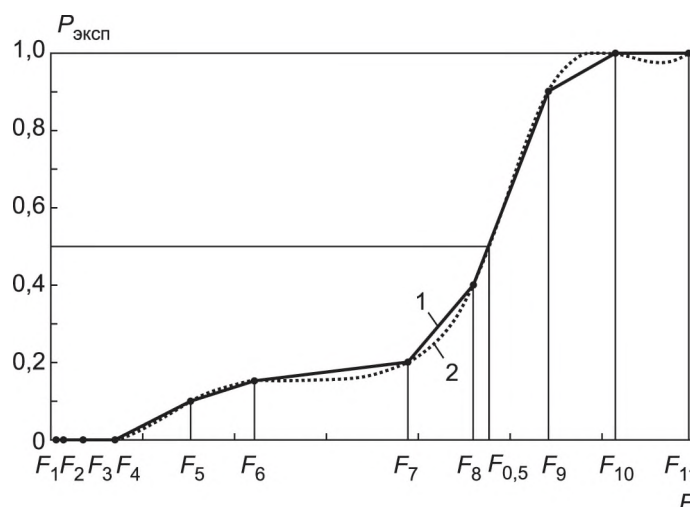


Рис. 2. Зависимость вероятности пробоя $P_{эксп}$ от плотности энергии F падающего излучения; экспериментальные значения F_i ($i=1, 2, \dots, 11$) отмечены точками; 1, 2 – линейная и сплайновая интерполяции, соответственно

качестве основного значения взято среднее арифметическое этих величин

$$P_{\text{экс}}(F) = [P_{\text{л}}(F) + P_{\text{спл}}(F)]/2, \quad (4)$$

где $P_{\text{л}}$, $P_{\text{спл}}$ – значения вероятности, полученные линейной и сплайновой интерполяцией, соответственно.

При проведении экспериментального этапа предлагается начинать облучение со средних значений плотности энергии и далее поочередно увеличивать и уменьшать значения плотности энергии излучения с заданным шагом. При получении нулевой и единичной вероятности можно остановить процесс облучения поверхностей для излучения с меньшей и большей плотностью энергии, соответственно. Это позволяет резко уменьшить требуемое число измерений, что ведёт к существенной экономии в энергопотреблении установки при реализации данного способа.

Кривая вероятности $P_{\text{экс}}(F)$ (см. рис. 2) важна для определения двух величин, описывающих разрушение поверхности материала. Первая из них – пороговое значение плотности энергии разрушения, определённое непосредственно по графику на рис. 2. За пороговое значение плотности энергии разрушения принимаем значение $F_{0,5}$ плотности энергии при вероятности $P=0,5$, которое необходимо при определении оптической прочности согласно [3]. Вторая величина – модуль Вейбулла m , который будет получен на аналитическом этапе метода.

Анализ результатов. На этом этапе экспериментальную кривую вероятности $P_{\text{экс}}(F)$ из (4) моделируют с помощью статистического распределения Вейбулла–Гнеденко кривой $P_{\text{ВГ}}(F)$ из (2). Для этого с помощью соответственных методов создаётся сетка шаблонов по значениям параметров K , M . Параметр K числа дефектов изменяется в диапазоне $1, \dots, k_{\text{max}}$ с шагом, равным единице. Значения параметров модуля Вейбулла m для M выбираются из диапазона $m_{\text{min}}, \dots, m_{\text{max}}$ с шагом $m_{\text{шаг}}$. Значения $k_{\text{max}}, m_{\text{min}}, m_{\text{max}}$ определяют по предварительным данным о материале. Значение $m_{\text{шаг}}$ находят из условий требуемой точности решения. Таким способом создаётся сетка шаблонных функций

$$P_{\text{ш}}(K, M, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \sum_{j=1}^K (F/F_{0,5})^{M_j} \right\}, & F > 0; \\ 0, & F \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $P_{\text{ш}}$ – функция вероятности разрушения материала из шаблонной сетки; K – параметр, обозначающий общее количество разных видов дефектов для данной функции сетки; $M = (M_1, M_2, \dots, M_K)$ – сочетание K элементов, выбранных из заданного диапазона значений $m_{\text{min}}, \dots, m_{\text{max}}$.

Минимизируя среднеквадратичное отклонение, оценивая его достоверность модели:

$$\sigma(K, M) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_F} [P_{\text{ш}}(K, M, F_i) - P_{\text{экс}}(F_i)]^2}{N_F - 1}},$$

где σ – среднеквадратичное отклонение вероятности $P_{\text{ВГ}}$, вы-

численной по (5), от экспериментальной вероятности $P_{\text{экс}}$; N_F – общее количество различных плотностей энергии, при которых облучался материал в эксперименте.

Распределение P^* из сетки распределений Вейбулла–Гнеденко $P_{\text{ш}}$, для которого $\sigma(K^*, M^*)$ имеет минимум и будет искомым функциональной зависимостью вероятности разрушения P^* образца от плотности энергии F падающего излучения, полученной по экспериментальной зависимости $P_{\text{экс}}(F)$. Таким образом, по результатам аналитического этапа в предлагаемом методе получают функцию вероятности разрушения поверхности материала:

$$P^*(K^*, M^*, F_{0,5}, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \sum_{j=1}^{K^*} (F/F_{0,5})^{M_j^*} \right\}, & F > 0; \\ 0, & F \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

с известными значениями K^* , M^* , $F_{0,5}$, определёнными на первом и втором этапах метода.

Выражение зависимости оптической прочности Q поверхности материала от плотности энергии F падающего излучения имеет следующий вид:

$$Q(F) = \begin{cases} \exp \left\{ -\ln 2 \sum_{j=1}^{K^*} \left(\frac{F}{F_{0,5}} \right)^{M_j^*} \right\}, & F > 0; \\ 0, & F \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

где Q – оптическая прочность облучаемого объёма материала.

Закключение. В результате экспериментов получено, что погрешность вычислений, установленная на основании сравнения экспериментальных данных и измеренных для набора параметров с $j=1, 2, 3$ по (7) с доверительной вероятностью 0,9 не превышает 18 % [5, 6].

Таким образом, разработанный метод оценки и прогнозирования оптической прочности (прочностных свойств) поверхности оптических материалов с использованием статистического распределения Вейбулла–Гнеденко является результатом многолетних исследований прочности оптических материалов (силовой оптики), проведённых авторами для учёта влияния различных физических факторов на оптическую прочность. В предположении, что разрушение материала происходит вследствие разогрева микродефектов различных видов, применение распределения Вейбулла позволяет определить количество этих видов. Также данный метод позволяет без дополнительных измерений (неравномерного) распределения интенсивности в пучке излучения определять оптическую прочность материалов и прогнозировать надёжность работы материала в условиях воздействия мощного лазерного излучения.

Л и т е р а т у р а

1. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Погрешности определения теплофизических характеристик методом лазерной вспышки, обусловленные толщиной образца и длительностью

теплового импульса // Измерительная техника. 2012. № 4. С. 51–54.

2. Баршутин М. Н., Барчански А. Применение метода импульсной лазерной абляции для получения контрастных жидкостей на основе наночастиц оксида диспрозия DY_2O_3 // Измерительная техника. 2017. № 3. С. 12–14.

3. Маненков А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твёрдых тел // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 1. С. 179–211.

4. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301–333.

5. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Лазерное абляционное разрушение нанопленок на поверхности стеклянных образцов // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 2. С. 5–10.

6. Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. The Optical Strength of

the Glass Nanocomposites at Laser Ablation // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. No. 1. P. 012012.

7. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 34–36.

8. Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Nanocomposites Laser Ablation Studies // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2015. No. 1. P. 82–86.

9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

Дата принятия: 28.02.2018.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.361

Передача высокостабильных сигналов частоты по волоконно-оптической линии связи на расстояние 150 км

В. В. ГРИГОРЬЕВ, В. Е. КРАВЦОВ, А. К. МИТЮРЕВ, К. Б. САВКИН, С. В. ТИХОМИРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: f3@vniiofi.ru

Представлены результаты исследований установки для передачи высокостабильного сигнала частоты с относительной нестабильностью не более $4 \cdot 10^{-17}$ по волоконно-оптической линии связи на расстояние 150 км. В установке используются внешняя модуляция лазерного излучения и активная электронная компенсация фазовых шумов. Установка позволяет обеспечить синхронизацию или сличение шкал времени удалённых друг от друга стандартов времени и частоты, входящих в состав эталонов времени и частоты высших разрядов.

Ключевые слова: эталоны времени и частоты, высокостабильный сигнал частоты, волоконно-оптическая линия связи, активная электронная компенсация фазовых шумов.

Presented the results of research of device for the transmission of highly stable frequency signal over 150 km optical fiber at the $4 \cdot 10^{-17}$ relative error using external modulation of laser radiation and the active electronic compensation of phase noise. The device allows you to synchronize or compare time scales of remote from each other oscillators included in the primary and secondary standards of time and frequency.

Key words: standards of time and frequency, highly stable frequency signal, optical fiber, the active electronic compensation of phase noise.

При сличении шкал времени стандартов времени и частоты, обладающих относительной нестабильностью воспроизведения частоты $1 \cdot 10^{-15}$ и менее и удалённых друг от друга на расстояния от нескольких единиц до сотен километров, целесообразно использовать волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Это обусловлено тем, что точность передачи эталонных сигналов по волоконно-оптическому каналу соизмерима, а в некоторых случаях значительно превышает точность передачи, например, по атмосферным и космическим каналам и по каналам, основанным на использовании транс-

портируемых квантовых часов. Кроме того, применение оптического волокна в качестве канала передачи сигналов частоты позволяет обеспечить непрерывную синхронизацию шкал времени удалённых стандартов.

Существуют различные методы передачи сигналов частоты по ВОЛС на расстояния от нескольких единиц до сотен километров. Эти методы могут быть основаны на пассивной, активной электронной или оптоэлектронной компенсациях фазовых шумов сигналов частоты, возникающих при их передаче, а также на внутренней или внешней модуляции опти-