

С. В. ГАГАРСКИЙ, В. С. ЕРМОЛАЕВ, А. Н. СЕРГЕЕВ, М. В. ПУЗЫК

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА ОПТИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Представлена методика определения порога оптического разрушения в объеме прозрачных диэлектриков и на поверхности элементов силовой лазерной оптики, позволяющая определять статистику оптического пробоя в режиме воздействия одиночным лазерным импульсом и в режиме накопления. Приведены результаты измерений порога оптического пробоя на элементах, поверхность которых обработана по предложенной технологии химико-механической полировки.

*Ключевые слова:* лучевая прочность, прозрачный диэлектрик, лазерно-индуцированный пробой, обработка поверхности.

**Введение.** Определение лучевой прочности оптических компонентов силовых лазерных установок, используемых в различных технологиях обработки материалов, дальнометрии, медицине, а также при научных исследованиях, — одна из актуальных задач развития лазерной техники. Выявление физических причин светового разрушения широкозонных диэлектриков и зависимости лучевой прочности различных оптических материалов от их структуры, а также таких параметров, как длина волны используемого излучения, длительность импульсов, размеры светового пучка, периодичность и полное время воздействия импульсного излучения, вызывает стабильный интерес в условиях постоянного роста требований к уровню удельной выходной мощности и ресурсу работы современных лазерных систем [1—6]. Помимо физической лучевой прочности материала, которая определяется энергетической структурой его уровней и химическим составом, существует и технологическая прочность, которая зависит от технологии изготовления (выращивания, варки и т.д.) объемного материала, обработки поверхностей и нанесения оптических покрытий. Для оптических элементов мощных лазерных систем одним из наиболее важных параметров является лучевая прочность поверхностей, на которые наносится металлическое или диэлектрическое покрытие. Оперативное определение зависимости долговременной лучевой прочности оптических поверхностей от технологических режимов их изготовления и используемых материалов представляется весьма актуальной задачей. В настоящей статье предложена экспресс-методика определения объемной лучевой прочности прозрачных диэлектриков, а также лучевой прочности оптических поверхностей и их покрытий с использованием килогерцовых лазерных излучателей.

**Схема установки и методика измерений порога оптического разрушения материалов.** Суть предлагаемой методики состоит в том, что лазерный импульс, после прохождения через зеркальную систему углового сканирования и телецентрическую фокусирующую систему, направляется на исследуемый объект, в объеме или на поверхности которого определяется порог оптического разрушения. Оптическая система совместно с системой Z-коррекции обеспечивают фокусировку излучения в одной плоскости в широком диапазоне углов падения на входе в фокусирующий объектив при минимальном изменении диаметра сфокусированного пучка в пределах поля сканирования. В процессе сканирования лазерный пучок формирует концентрические зоны фокусировки излучения, в каждую из которых направляется выбранное количество импульсов с определенной энергией. Энергия импульсов дискретно изменяется в радиальном направлении от зоны к зоне в соответствии с заданным шагом, причем направление этого изменения выбирается либо от центра к периферии поля сканирования, либо наоборот. Таким образом, устраняется погрешность, связанная с остаточными aberrациями, вносимыми оптической системой и возможными динамическими тепловыми процессами в лазерном источнике. Для исследования процессов накопления при оптическом пробое цикл сканирования может многократно повторяться посредством введения в каждую из точек фокусировки выбранного количества импульсов с заданным интервалом. За один цикл сканирования производится такое число выстрелов, которое обеспечивает необходимую точность измерений.

Схема установки, которая использовалась в ходе экспериментов, приведена на рис. 1. Импульс запуска 2 от платы управления, установленной в персональном компьютере 1, включает импульс накачки в блоке питания лазерного диодного модуля 3. Световая накачка передается в лазерный излучатель 5 по оптическому волокну 4 с диаметром сердцевины 600 мкм с числовой апертурой  $Na=0,22$ .

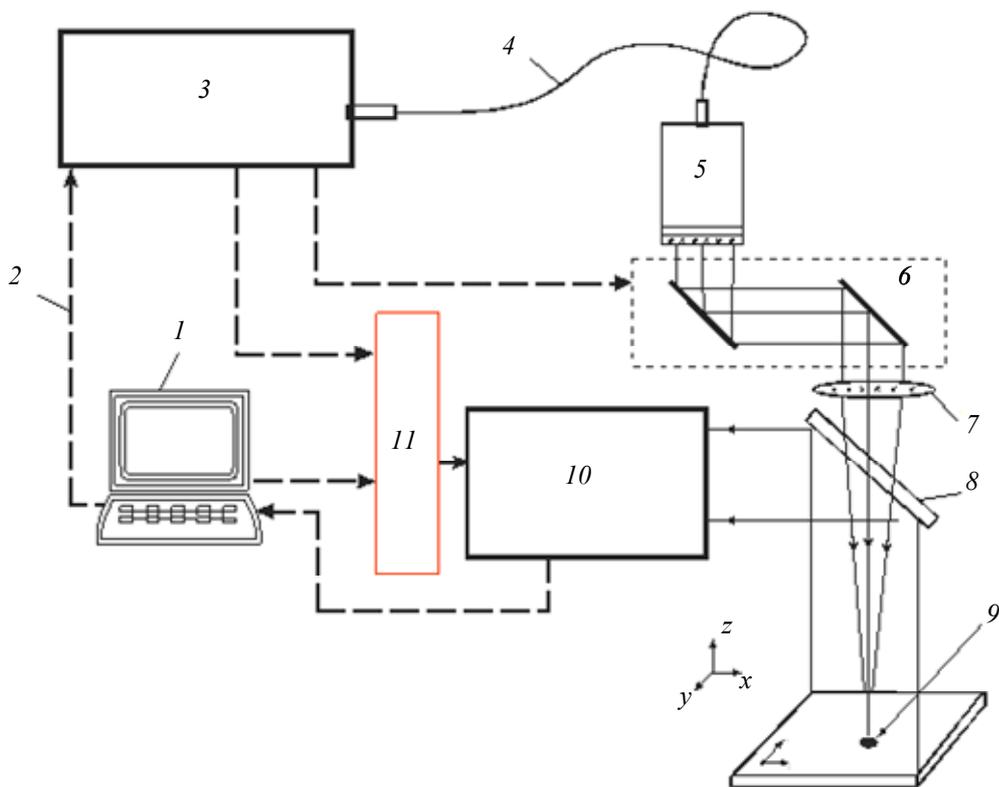


Рис. 2

В описанном далее цикле экспериментов в качестве излучателя использовался лазер на кристалле ванадата иттрия типа VLC-3 [7] с продольной диодной накачкой от модуля JOLD QPXF 50-2L, электрооптической модуляцией добротности и скоростным электронным

модулем управления энергией выходных импульсов. Частота повторения импульсов генерации достигала 2 кГц, длительность  $\tau_{1/2} = 4,6$  нс, максимальная энергия импульсов на фундаментальной длине волны  $\lambda = 1064$  нм превышала 2 мДж. Параметр качества поперечного распределения пучка ( $M^2$ ) после преобразования его во вторую гармонику и прохода через всю оптическую схему составлял величину 1,35. Существенной особенностью излучателя типа VLC-3, снабженного блоком питания LDMPS 100 [8], является оригинальная система программного управления электрооптическим затвором, позволяющая изменять энергию в каждом из следующих с кГц частотой лазерных импульсов практически без изменения пространственно-временной структуры излучения. Используемые в измерениях импульсы близки к гауссовым по распределению как во времени, так и в пространстве. Нестабильность энергии от импульса к импульсу не превышала 2 %. Значение пиковой интенсивности по измеренному значению энергии  $E_0$  импульса в этом случае определялось как

$$I_{\max} = 16\pi^{-3/2} (\ln 2)^{1/2} E_0 / \tau_{1/2} 2\omega,$$

где  $\tau_{1/2}$  — длительность импульса по уровню 0,5;  $2\omega$  — полная ширина пучка по уровню  $e^{-2}$ .

Расширенный выходным телескопом пучок (см. рис. 1) после прохождения через систему углового сканирования 6 (HurrySCAN, SCANLAB AG) фокусируется на исследуемый объект 9 через спектроделитель 8 телецентрическим объективом 7 (PhotonicsDevices 532-120). Изображение исследуемого участка объекта считывается видеокамерой 10 с системой управления 11 и обрабатывается компьютером. Изначально записывается опорная картина расположения координат точек локализации лазерного разрушения на исследуемой поверхности при постоянном значении энергии входного импульса, заведомо превышающем порог оптического пробоя объекта (рис. 2, а). Эта картина необходима также для записи текущего состояния светового фона, записываемого камерой. Затем, после перемещения или смены образца, сканирование производится в соответствии с выбранным законом изменения энергии импульсов, направляемых к точкам в центре и на периферии исследуемого участка (рис. 2, б).

а)

б)

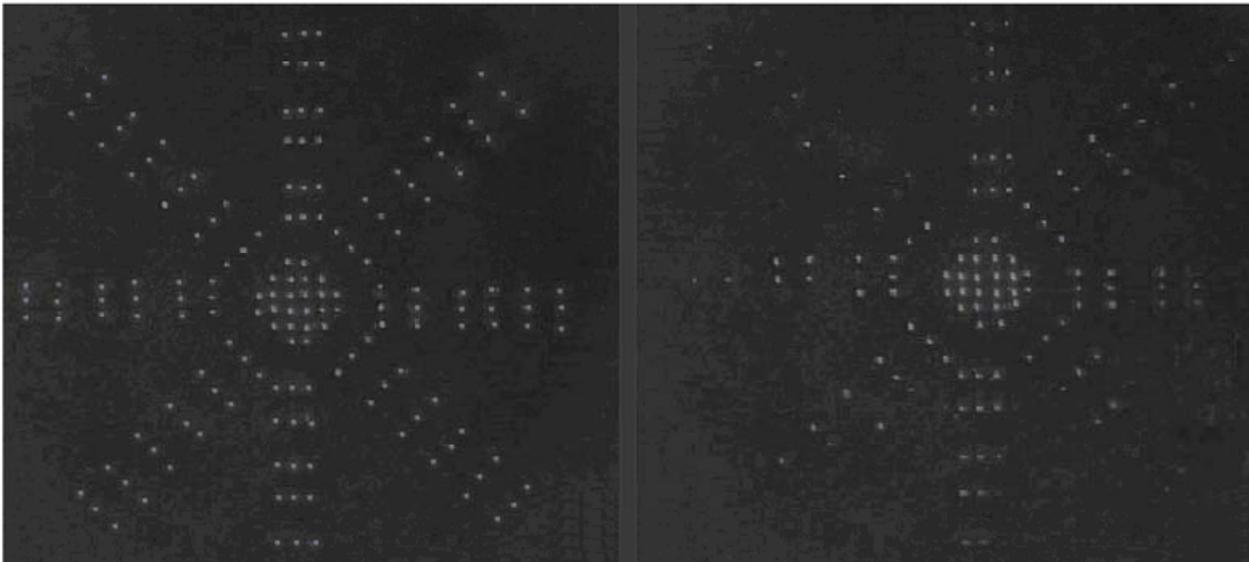


Рис. 2

В результате за один цикл сканирования, проводимый в течение 1 с (100—1000 выстрелов), определяется зависимость вероятности оптического разрушения исследуемого объекта от энергии входного импульса.

**Эксперимент.** По вышеизложенной методике было проведено сравнительное исследование лучевой прочности диэлектрических просветляющих покрытий  $\text{SiO}_2\text{—Y}_2\text{O}_5\text{—SiO}_2$ , нанесенных на образцы кварцевого стекла КУ1. Часть исследуемых образцов перед нанесением покрытия в вакуумной камере после проведения стандартной процедуры глубокой шлифовки-полировки подвергалась дополнительной химико-механической гидрообработке. Технология такой обработки, условно называемой финишной полировкой, была разработана совместно специалистами НИУ информационных технологий, механики и оптики и Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (оба — Санкт-Петербург) [9]. Эта технология базируется на реализации условий постоянного и равномерного взаимодействия направленного потока суспензии, содержащей абразивный материал, с поверхностью обрабатываемого изделия. Технология используется для обработки различных твердых материалов без ограничений на их геометрическую форму и размеры. При обработке не изменяются геометрические параметры изделий, изменяется только микрорельеф поверхности и устраняются посторонние микровключения. Для успешного проведения процесса обработки необходимо обеспечить соблюдение условий ламинарности потока рабочей суспензии, обладающей определенной вязкостью и химической активностью, а также поддержания заданного значения угла, при котором абразивные частицы сталкиваются с образующей обрабатываемой поверхности. Выбор используемых компонентов и режима обработки определяется твердостью материала изделия. В результате этой процедуры значительно уменьшаются шероховатость и концентрация остаточных микровключений на обработанной поверхности, частично сглаживаются микронеровности. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению локальных коэффициентов диффузного отражения и поглощения оптической поверхности. Данная технология может применяться как самостоятельно (как завершающая фаза полировки), так и в сочетании с ионно-лучевыми и ионно-плазменными методами очистки поверхностей [10], в частности при подготовке изделия для нанесения диэлектрических или металлических покрытий.

После 6-часового цикла обработки значения шероховатости поверхности исследуемых образцов уменьшались относительно начального значения, соответствующего классу чистоты  $R_z=0,05$  (для выбранных бездефектных участков), приблизительно в 3 раза (до  $R_z=0,015$ ) при соответствующем уменьшении высоты максимумов микрорельефа от 8—12 нм до 2—3 нм. Измеренное значение коэффициента остаточного диффузного рассеяния при этом уменьшилось более чем в два раза.

В проведенном цикле измерений лучевой прочности диэлектрических покрытий диаметр лазерного пучка на длине волны 532 нм в плоскости фокусировки объектива составлял 29 мкм, погрешность позиционирования центра пучка не превышала 2 мкм. При осуществлении за 1 цикл сканирования порядка 100 выстрелов погрешность определения порога разрушения в выбранных объектах оценивалась как  $\pm 10\%$ . На рис. 3 приведен график зависимостей вероятности ( $P$ ) появления лазерно-индуцированного пробоя просветляющего диэлектрического покрытия, нанесенного на поверхность плавленого кварца КУ1, от плотности энергии

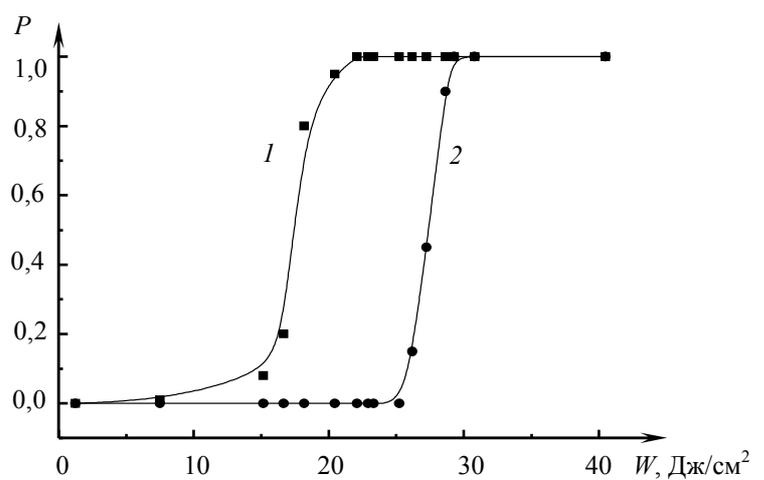


Рис. 3

от плотности энергии

падающего излучения ( $W$ ): кривая 1 соответствует образцам с оптическими поверхностями, обработанными методом глубокой шлифовки-полировки в соответствии с ОСТ 3-6043-86; кривая 2 характерна для аналогичных образцов, но с поверхностями, подвергнутыми дополнительной процедуре финишной полировки. Нанесение диэлектрических покрытий проводилось в одном технологическом цикле.

Измеренные значения порога разрушения диэлектрического просветляющего покрытия, определяемые по уровню 50 %-ной вероятности появления разрушения в произвольной точке (см. рис. 3) поверхности, составили соответственно  $17,5 +5/-10$  Дж/см<sup>2</sup> и  $27,5 \pm 2,5$  Дж/см<sup>2</sup> для исходных образцов и образцов, прошедших дополнительную обработку.

**Заключение.** С использованием представленной в настоящей статье методики измерения лучевой прочности оптических материалов было проведено определение порогов лазерного разрушения диэлектрических покрытий, нанесенных на оптические подложки, поверхность которых была обработана по разработанной технологии химико-механической финишной полировки. В результате измерений установлено, что процедура финишной обработки наряду с увеличением значения лучевой прочности покрытия, усредненного по площади оптической поверхности, приводит также к существенному сокращению дисперсии измеренных значений порога разрушения в точках, расположенных в пределах площади обработанной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Имас Я. А.* Оптический пробой прозрачных диэлектриков // Обзор экспериментальных работ. Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1982. 60 с.
2. *Колодный Г. Я., Левчук Е. А., Подрядин Ю. Д., Яковлев П. П.* Многослойные интерференционные покрытия в квантовой электронике // Электронная промышленность. 1981. № 5—6. С. 93—101.
3. *Маненков А. А., Прохоров А. М.* Лазерное разрушение прозрачных тел // Успехи физ. наук. 1986. Т. 148, вып. 1. С. 5—38.
4. *Покотило И. Л.* Развитие теории лазерного разрушения прозрачных оптических материалов: Зависимость порога разрушения от длительности импульса и закономерности разрушения покрытий: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный, 1998.
5. *Дьюли У.* Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986. 504 с.
6. *Рэди Дж.* Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 356 с.
7. *Гагарский С. В., Приходько К. В.* Мощный наносекундный эрбиевый лазер с диодной накачкой // Тез. докл. XXXVI науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ). СПб, 2007.
8. *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. № 2. С. 158—159.
9. *Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Иночкин М. В., Сергеев А. Н., Шимберев Б. В.* Лазерные оптические элементы: лучевая прочность, обработка поверхности // Тез. докл. XXXVII науч. и учеб.-метод. конф. СПбГУ ИТМО. СПб, 2008.
10. *Черезова Л. А.* Ионно-лучевые методы в оптической технологии. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.

#### Сведения об авторах

- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Владимир Сергеевич Ермолаев** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; ст. науч. сотрудник

- Андрей Николаевич Сергеев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: mg\_phoenix@yahoo.com
- Михаил Владимирович Пузык** — канд. хим. наук, доцент; Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, кафедра неорганической химии, Санкт-Петербург; E-mail: puzyk@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники и биомедицинской  
оптики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
16.06.11 г.