

НАГРЕВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОЧИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

П. А. НОСОВ, А. Ф. ШИРАНКОВ, Р. С. ТРЕТЬЯКОВ,
А. Г. ГРИГОРЬЯНЦ, А. Я. СТАВЕРТИЙ

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, Россия
E-mail: pan@bmstu.ru*

Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева непрерывным излучением мощного волоконного лазера оптических элементов, изготовленных из отечественного высококчистого кварцевого стекла марки КС-4В. Определена максимальная температура оптических элементов при различных значениях плотности мощности излучения. Проанализирована возможность использования результатов исследований кварцевого стекла КС-4В для силовой оптики из других марок кварцевых стекол российского и зарубежного производства (КУ-1, Suprasil 300 и SK-1300).

Ключевые слова: силовая оптика, лазерная оптика, высококчистое кварцевое стекло, мощный волоконный лазер, лазерная головка, лазерные технологии, термоабберации оптической системы

Лазеры ближнего ИК-диапазона широко применяются в различных технологических процессах обработки материалов, поскольку излучение на длине волны около 1 мкм интенсивно поглощается металлами. В настоящее время в лазерных технологических установках широко используются непрерывные иттербиевые волоконные лазеры с мощностью излучения от единиц до нескольких десятков киловатт [1—5].

На качество обработки материала влияют характеристики узлов лазерной технологической установки. Одним из таких ключевых узлов является лазерная головка, а точнее — ее оптическая система, формирующая пучок излучения мощного лазера. К разработке и изготовлению элементов силовой оптики предъявляются особые технические требования.

Элементы оптической системы, формирующие лазерное излучение высокой мощности, подвергаются тепловому воздействию. Под действием мощного лазерного излучения на элементы оптической системы вследствие изменения их температуры, а значит и показателя преломления стекла, геометрических параметров оптических и механических деталей лазерной головки [6—12], изменяются фокусные расстояния компонентов, их фокальные отрезки, увеличение и как следствие — параметры пучка в зоне обработки материала.

Моделирование формирования пучка фокусирующей линзой лазерной головки с фокусным расстоянием 200 мм показало [7], что при нагреве линзы на 100 °С перетяжка смещается в лево \approx на 1 мм относительно исходного положения.

Изменение оптической силы однолинзового компонента лазерной головки в работе [7] характеризуют параметром $\Psi_p = -[\alpha - \beta/(n-1)]$, который определяется коэффициентом теплового линейного расширения α , термооптической постоянной стекла β , показателем преломления стекла линзы n на рабочей длине волны лазерного излучения. В работах [10—12] приводятся выражения, позволяющие рассчитать вызванные нагревом элементов изменения конструктивных параметров оптической системы лазерной головки: радиуса кривизны преломляющих поверхностей, толщины линз и воздушных промежутков, показателя преломле-

ния стекла. Для этого необходимо знать, насколько изменилась температура dt оптических элементов системы. Данные о характере изменения температуры оптических элементов лазерной головки, вызванного воздействием мощного лазерного излучения, позволят проектировать оптические системы, характеризующиеся малыми отклонениями параметров выходного пучка.

Для изготовления проходной оптики лазерных головок, формирующих мощное излучение волоконных лазеров, используют различные марки высокочистого кварцевого стекла с предельно низким содержанием гидроксильных групп, бесвильного, высшей категории по содержанию пузырей и включений, с высокой радиационно-оптической устойчивостью и высоким пропусканием в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Этим требованиям в достаточной мере удовлетворяют российские кварцевые стекла марок КС-4В и КУ-1; зарубежными аналогами этих марок являются Suprasil 300 (Heraeus) и SK-1300 (OHARA).

В настоящей работе исследуется изменение температуры защитного стекла лазерной головки, изготовленного из отечественного кварцевого стекла марки КС-4В, при воздействии излучения непрерывного волоконного лазера киловаттного диапазона мощности.

Экспериментальные исследования и результаты. Для проведения экспериментальных исследований использовалось оборудование технологической лаборатории Московского центра лазерных технологий. Экспериментальный стенд включал волоконный лазер ЛС-4-К с максимальной мощностью излучения 4 кВт, промышленный робот ABB IRB2400, коллимирующий узел с фокусным расстоянием 125 мм, фокусирующий узел с фокусным расстоянием 300 мм, исследуемые защитные стекла, тепловизор модели Testo 885, керамические поглотители отраженного и прошедшего излучения (рис. 1). Излучение иттербиевого волоконного лазера ЛС-4К (длина волны 1070 нм [13]) подводилось волокном с диаметром сердцевины 50 мкм. Исследования проводились для защитных стекол из кварцевого стекла марки КС-4В диаметром 50 мм и толщиной 2 мм, обработанных методом глубокой шлифовки и полировки, без просветляющего покрытия и с лучестойким просветляющим покрытием. Глубокая шлифовка и полировка (ГШП) изготавливаемых оптических элементов позволяет убрать трещиноватый слой, который снижает их лучестойкость.

На спектрофотометре Lambda 950 был измерен спектральный коэффициент пропускания защитных стекол на рабочей длине волны излучения волоконного лазера: без просветляющего покрытия — 93 %, а с покрытием — 99,96 %.

Исследуемое защитное стекло устанавливалось в расходящемся пучке после фокусирующей линзы (см. рис. 1, справа от перетяжки пучка на расстоянии 25 см) под углом $\approx 15^\circ$ к падающему пучку. Диаметр лазерного пучка в этом сечении по уровню 0,86 от полного потока равен $D_{0,86}=10$ мм. Тепловизор, измерявший распределение температуры поверхности защитного стекла, находился на расстоянии 80 см от него.

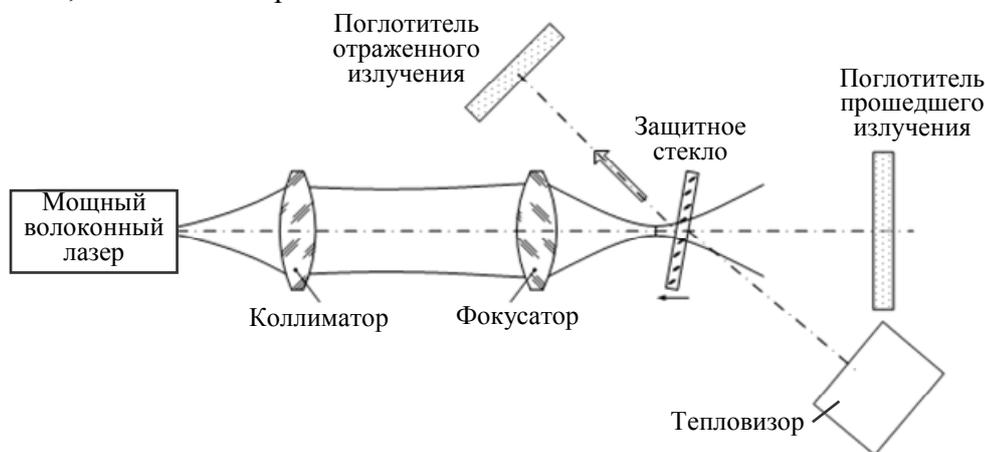


Рис. 1

Результаты измерений максимальной температуры t_{\max} защитного стекла без просветляющего покрытия для нескольких значений мощности волоконного лазера P за время τ приведены в табл. 1.

Таблица 1

P , Вт	τ , мин	t_{\max} , °С
50	1	22,9
150	2	23,6
500	2	24,6

Исследования показали, что при плотности мощности излучения $I < 0,64$ кВт/см² защитное стекло без просветления нагревается незначительно. Этот результат позволяет судить о высоком качестве кварцевого стекла марки КС-4В. Подобные исследования при более высоких мощностях излучения не проводились, поскольку существенный поток обратного отражения может вызвать нарушение нормальной работы волоконного лазера.

Значения максимальной температуры t_{\max} защитного стекла с просветляющим покрытием для различных значений мощности волоконного лазера P за время τ представлены в табл. 2.

Таблица 2

P , Вт	τ , мин	t_{\max} , °С
20	2	21,5
50	1	21,6
150	1	22,1
500	1	22,3
1000	2	25,2
2000	2	30,7
3000	2	35,3

Согласно работе [6], 1—2 мин в зависимости от мощности излучения лазера вполне достаточно для установления стационарного распределения поля температуры при мощности излучения непрерывного волоконного лазера несколько киловатт.

При диаметре пучка 10 мм и мощности излучения 3 кВт плотность мощности излучения на поверхности защитного стекла составляет 3,8 кВт/см². Приближение защитного стекла к перетяжке пучка позволило ($D_{0,86}=8$ мм) обеспечить $I=6$ кВт/см², при этом температура в центре защитного стекла ($r=0$) составила 38 °С.

После получения удовлетворительных результатов при $I=6$ кВт/см² защитное стекло приблизили к перетяжке пучка. В новом положении диаметр пучка и плотность мощности излучения равны: $D_{0,86}=6$ мм, $I=10,6$ кВт/см². При этом температура в центре защитного стекла достигла 48,8 °С.

Согласно работе [14], плотность мощности пучка мощного волоконного лазера описывается распределением Гаусса. Результаты исследований показали, что для одной и той же

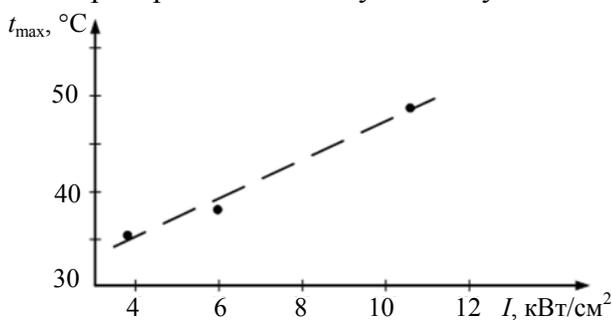


Рис. 2

мощности излучения лазера при увеличении плотности мощности излучения на поверхности защитного стекла уменьшается ширина распределения температуры.

Исследования, проведенные при мощности волоконного лазера 3 кВт, позволяют установить характер зависимости максимальной температуры защитного стекла от плотности мощности излучения (рис. 2, точки — экспериментальные данные, кривая — аппроксимация). Полученные данные вполне точно описываются линейной зависимостью $t_{\max}(I)=aI+b$. Для защитного стекла из КС-4В толщиной 2 мм с лучестойким просветляющим покрытием $a=2,03$ см²·°С/кВт, $b=26,93$ °С.

В табл. 3 приведены результаты сравнительного анализа физико-химических свойств кварцевых стекол КС-4В, КУ-1, Suprasil 300 и SK-1300 (показатель преломления составил 1,4631 на длине волны $\lambda=486,1$ нм; 1,4585 на $\lambda=587,6$ нм; 1,4564 на $\lambda=656,3$ нм; постоянная Аббе 67,8) [15—18].

Таблица 3

Параметр	Размерность	Марка стекла			
		КС-4В	КУ-1	Suprasil 300	SK-1300
<i>Механические свойства</i>					
Плотность	г/см ³	2,201			
Модуль упругости (Юнга)	ГПа	73		70	71,4
Модуль сдвига	ГПа	31		30	30,9
Коэффициент Пуассона		0,17			
Твердость по Кнупу	кг/мм ²	500		591—632	650—710
Предел прочности при сжатии (прочность на сжатие)	ГПа	1,1		1,15	1,13
Предел прочности при растяжении (прочность на разрыв)	МПа	50		50	54,9
<i>Термические свойства</i>					
Температура размягчения (<i>T</i> softening)	°С	1750	1600	1600	1700
Температура отжига (<i>T</i> annealing)	°С	1250	1120	1120	1160
Температура деформации	°С	1025		1000	1060
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	728 (25 °С)		772 (0—100 °С)	740
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	1,38			
Коэффициент теплового расширения	К ⁻¹	0,55·10 ⁻⁶ (в диапазоне 20—1000 °С)		0,51·10 ⁻⁶ (в диапазоне 0—100 °С)	0,55·10 ⁻⁶

Содержание примесей в рассматриваемых стеклах существенно различается, причем состав примесей КС-4В, полученного в разных плавках, довольно сильно различается, общее содержание примесей в стекле КУ-1 значительно выше [15—21].

Анализ физико-химических свойств кварцевых стекол позволяет говорить о том, что полученные в работе результаты для КС-4В могут быть обобщены и использованы при разработке и эксплуатации лазерной оптики из КУ-1, Suprasil 300 и SK-1300.

В работе представлены экспериментальные результаты нагрева излучением непрерывного волоконного лазера различной плотности мощности оптических элементов, изготовленных из КС-4В.

Для защитного стекла без просветляющего покрытия при плотности мощности излучения 0,64 кВт/см² максимальный нагрев зарегистрирован в центре защитного стекла. При такой плотности мощности излучения защитное стекло нагревается всего на несколько градусов. В то же время для защитного стекла с лучстойким просветляющим покрытием при 10,6 кВт/см² максимальная температура также была зарегистрирована в центре и составила 48,8 °С, а защитное стекло нагрелось на 27,8 °С.

В работе показано, что у высокочистых кварцевых стекол российских марок КС-4В и КУ-1 и зарубежного производства Suprasil 300 и SK-1300 практически совпадают физико-химические свойства. Поэтому экспериментальные результаты нагрева оптических элементов могут быть обобщены и использованы при разработке и эксплуатации лазерной оптики из указанных видов стекла. Однако окончательный вывод о возможности использования того или иного стекла в элементах силовой оптики, особенно в условиях серийного производства, необходимо делать с учетом технологических параметров их изготовления и по результатам отдельных исследований.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-08-00936 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting // J. of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol. 42, N 17. Art. no. 175507.
2. Powell J., Kaplan A. F. H. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO2 laser cutting // ICALEO 2012. 31st Intern. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2012. P. 277—281.
3. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
4. Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2008. 440 с.
5. Kliner D. A. V., Chong K., Franke J. et al. 4-kW fiber laser for metal cutting and welding // Proc. SPIE. Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications. 2011. Vol. 7914. Art. no. 791418.
6. Blomster O., Pålsson M., Roos S.-O. et al. Optics performance at high-power levels // Proc. SPIE. Solid State Lasers XVII: Technology and Devices. 2008. Vol. 6871. Art. no. 68712B.
7. Scaggs M., Haas G. Thermal lensing compensation objective for high power lasers // 29th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 — Congress Proceedings. 2010. Vol. 103. P. 1511—1517.
8. Battarel D., Fuss P., Durieux A., Martaud E. Aberration modeling of thermo-optical effects applied to wavefront fine-tuning and thermal compensation of Sodern UV and LWIR optical systems // Proc. SPIE. Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI. 2015. Vol. 9626. Art. no. 96 260M.
9. Bonhoff T., Büsing L., Stollenwerk J., Loosen P. Modeling of optical aberrations due to thermal deformation using finite element analysis and ray-tracing // Proc. SPIE. Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI. 2015. Vol. 9626. Art. no. 96 261V.
10. Bass M. Handbook of Optics. Vol. 1. McGraw-Hill, Inc., 1995. 1604 p.
11. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 543 с.
12. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
13. Основные характеристики промышленных волоконных лазеров [Электронный ресурс]: <<http://www.ntoire-polus.ru/HP%20fiber%20laser.pdf>>.
14. Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С. Разработка оптических головок технологических установок с мощными волоконными лазерами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Вып. 9 [Электронный ресурс]: <<http://engjournal.ru/articles/349/349.pdf>>.
15. Материал кварцевое стекло КУ — плавленный кварц SiO₂ [Электронный ресурс]: <http://www.elektrosteklo.ru/FS_UV_rus.htm>.
16. HERAEUS: Кварцевые стекла для оптики. Данные и свойства [Электронный ресурс]: <http://heraeus-quarzglas.com/media/webmedia_local/downloads/broschren_mo/DataandProperties_Optics_fusedsilica.pdf>.
17. OHARA QUARTZ: высококачественное кварцевое стекло [Электронный ресурс]: <<http://www.oharacorp.com/pdf/SK-1300.pdf>>.
18. ОХАРА: кварцевые стекла SK-1300, SK-1310, SK-1320 [Электронный ресурс]: <<http://ohara.com/download/quartz.pdf>>.
19. Сергеев А. П., Сергеев П. Б. Зависимости интенсивности полос поглощения в высокочистых кварцевых стеклах от флюенса электронного пучка // Оптич. журн. 2011. Т. 78, № 5. С. 77—83.
20. Вуколов К. Ю., Вуколов Н. Ю., Егоров Е. В., Левин Б. А., Яшин А. Ф. Наведенное оптическое поглощение в кварцевых стеклах КУ-1 и КС-4В после реакторного облучения // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2002. Вып. 1—2. С. 86—92.
21. Вуколов К. Ю., Левин Б. А., Скобкин В. С., Черемисин И. И., Попов С. А., Ермоленко Т. А., Евлампиев И. К., Туроверов П. К. Наведенное оптическое поглощение у кварцевых стекол КС-4В и КУ-1 в результате γ -облучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2001. Вып. 1. С. 66—72.

- Сведения об авторах**
- Павел Анатольевич Носов** — канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем; E-mail: pan@bmstu.ru
- Александр Федорович Ширанков** — канд. техн. наук; МГТУ им. Н. Э. Баумана, НИИ „Радиоэлектроники и лазерной техники“; начальник отдела; E-mail: ashirankov@mail.ru
- Роман Сергеевич Третьяков** — канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных технологий в машиностроении; E-mail: tret'yakov.roman@gmail.com
- Александр Григорьевич Григорьянц** — д-р техн. наук, профессор; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных технологий в машиностроении; заведующий кафедрой; E-mail: mt12@bmstu.ru
- Антон Яковлевич Ставертий** — аспирант; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных технологий в машиностроении; E-mail: mt12.anton@gmail.com

Рекомендована кафедрой
лазерных и оптико-электронных систем

Поступила в редакцию
07.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Носов П. А., Ширанков А. Ф., Третьяков Р. С., Григорьянц А. Г., Ставертий А. Я. Нагрев оптических элементов из высокочистых кварцевых стекол излучением мощных волоконных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1028—1033.

HEATING OF OPTICAL ELEMENTS MADE OF HIGH-PURITY QUARTZ GLASSES BY RADIATION FROM POWERFUL FIBER LASER

P. A. Nosov, A. F. Shirankov, R. S. Tret'yakov,
A. G. Grigoryants, A. Ya. Stavertiy

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia
E-mail: pan@bmstu.ru

Results of experimental study of heating of the optical elements made of high-purity quartz glass (Russian-made brand KS-4V) with radiation of high-power CW fiber laser are presented. Maximum temperatures of optical element at various power densities of the radiation are measured. The possibility of extrapolating the obtained results to power optics made of quartz glass of other brands produced in Russia and abroad (KU-1, Suprasil 300, and SK-1300) is discussed.

Keywords: power optics, laser optics, high-purity quartz glass, high-power fiber laser, optical system, laser head, laser technology, thermal-optical aberration

Data on authors

- Pavel A. Nosov** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems; E-mail: pan@bmstu.ru
- Alexander F. Shirankov** — PhD; Bauman Moscow State Technical University; SRI "Radio Electronics and Laser Technology"; Head of Department; E-mail: ashirankov@mail.ru
- Roman S. Tret'yakov** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering; E-mail: tret'yakov.roman@gmail.com
- Alexander G. Grigoryants** — Dr. Sci., Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering; Head of the Department; E-mail: mt12@bmstu.ru
- Anton Ya. Stavertiy** — Post-Graduate Student; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering; E-mail: mt12.anton@gmail.com

For citation: Nosov P. A., Shirankov A. F., Tret'yakov R. S., Grigoryants A. G., Stavertiy A. Ya. Heating of optical elements made of high-purity quartz glasses by radiation from powerful fiber laser // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 12. P. 1028—1033 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033