

С.Г. Казанцев

## Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК-оптики. Часть 2. Способы повышения лазерной стойкости и срока службы оптических элементов

ФГУП «Гос.НИИ лазерный центр РФ «Радуга»», г. Радужный Владимирской области

Поступила в редакцию 22.01.2003 г.

Систематизация видов и условий возникновения повреждений материалов силовой ИК-оптики в пучках широкоапертурных лазеров, основанная на результатах ранее проведенных экспериментальных исследований, позволила создать технологический ряд окон для CO<sub>2</sub>-лазеров с энергией излучения до 25 кДж в импульсном и со средней мощностью до 100 кВт в импульсно-периодическом режимах. Разработаны технологические и конструкционные методы повышения лазерной стойкости материалов ИК-оптики.

Технология изготовления оптических элементов является одним из наиболее важных факторов, определяющих работоспособность лазерной оптики. Она включает два основных этапа: получение материала и технологические обработки при изготовлении из него оптического элемента.

Совершенствованием технологии выращивания кристаллов можно добиться уменьшения коэффициента поглощения на рабочей длине волны  $\beta$  за счет снижения концентрации в них инородных примесных включений, так как общий коэффициент поглощения является простой суперпозицией коэффициентов поглощения материала и структурных дефектов. К настоящему времени в результате работ по совершенствованию способов выращивания оптических кристаллов, выполненных в ГОИ, ИК РАН, ФИ РАН, МИСиС, получены материалы, в которых концентрация примесей Fe, Cu, Ti, Pb, V, Mn, Ni, Co, Cr, Ba, Ca, S, Si, Al не превышает  $\sim 10^{-5}$  весовых процентов, а значения коэффициентов поглощения приближены к теоретически возможным пределам [1, 3].

Улучшения некоторых параметров материалов можно добиться не только в процессе их получения. В частности, значительно повысить механические характеристики позволяет метод пластической деформации монокристаллов с последующей рекристаллизацией. При этом в кристалле образуется мелкозернистая поликристаллическая структура, и упрочнение материала происходит вследствие затруднения движения вторичных дислокаций в результате создания собственных дефектов.

Разработан способ термомеханической обработки крупногабаритных пластин (до 300 мм) из щелочно-галогенидных кристаллов (ЩГК). В результате поляризационно-оптических и микроструктурных исследований установлено, что наиболее однородной структура получается после одноосной деформации монокристаллических пластин вдоль направления  $\langle 001 \rangle$  со скоростью  $0,07\text{--}0,2 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$  до степени деформации  $\epsilon = 10\text{--}25\%$  при температурах не более 200–300 °С. Упрочненные по данному режиму кристаллы имеют предел текучести  $\sigma_p$  в 4–7 раз больший, чем исходные монокристаллы [1–4].

Исследования лазерной стойкости упрочненных ЩГК показали, что только одноосное деформационное упрочнение, в процессе которого образуется однородная мелкозернистая структура, не приводит к ухудшению оптического качества по сравнению с исходным материалом. При этом за счет увеличения предела текучести материалов толщину изготавливаемых из них оптических элементов можно уменьшить в 2–3 раза, а следовательно, во столько же раз снизить величину облучаемого объема. Что, в результате проявления размерного эффекта, значительно повышает их стойкость к воздействию импульсного лазерного излучения, а также позволяет существенно экономить материалы [1, 5].

Под действием непрерывного лазерного излучения разрушение упрочненных ЩГК, так же как и монокристаллических материалов, носит термомеханический характер и происходит в результате постепенного накопления внутренних термоиндуцированных напряжений. Поэтому увеличение механической прочности кристаллов приводит к значительному повышению их лазерной стойкости и долговечности  $t_p$  (таблица).

Стойкость к воздействию непрерывного лазерного излучения, механические и оптические характеристики деформационно-упрочненных кристаллов КС1

Режим термомеханической обработки ( $t, \epsilon$ )	$q$ , кВт·см <sup>-2</sup>	$t_p$ , мин	$\sigma_p$ , кг·мм <sup>-2</sup>	$\beta(10,6 \text{ мкм})$ , см <sup>-1</sup>
Монокристалл	3,75	25	0,18	$2 \cdot 10^{-4}$
200 °С; 20%	6,25	150	1,2	$8 \cdot 10^{-4}$
360 °С; 50%	3,75	120	0,86	$2 \cdot 10^{-3}$
300 °С; (20+20)%	5	100	0,94	$4 \cdot 10^{-3}$
400 °С; (40+40)%	5	90	0,75	$8 \cdot 10^{-3}$
200 °С; (10+10+15)%	5	110	0,9	$3 \cdot 10^{-3}$
400 °С; (20+20+40)%	5	60	0,67	$2 \cdot 10^{-2}$

Повысить лазерную стойкость оптических элементов можно путем обработки их импульсами широкоапертурного лазерного излучения допороговой интенсивности, позволяющей провести «лазерную очистку» поверхности. Этот метод имеет ряд важных преимуществ: во-первых, не требу-

ется дополнительного технологического оборудования – лазерная стойкость оптических элементов повышается в результате облучения их излучением лазера, в оптическом тракте которого они используются; во-вторых, лазерная обработка может быть произведена всякий раз непосредственно перед пропусканьем рабочих импульсов; в-третьих, используемый технологический прием весьма прост.

Экспериментально установлено, что многократное воздействие одиночных импульсов  $\text{CO}_2$ -лазера микросекундной длительности с плотностью энергии  $W \leq 2-3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  приводит к увеличению порога повреждения поверхности оптических элементов и снижению вероятности повреждения при допороговых интенсивностях лазерного излучения. Этот эффект сохраняется в течение 1–3 ч после облучения и наиболее выражен при интервале между импульсами не более 15–20 мин [1, 6].

Регистрограммы интегральных спектров плазменных образований, возникающих при оптическом пробое вблизи поверхности, свидетельствуют об очистке поверхности от адсорбентов (прежде всего воды) – при воздействии первых 5–6 лазерных импульсов, имеющих близкие значения интенсивности, наблюдается последовательное снижение интенсивности свечения линии  $H_\alpha$ . Фотохронограммы плазменных образований показывают, что при воздействии двойных и тройных микросекундных импульсов с интенсивностью  $q \geq 1,8-8 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  (соответственно  $W \geq 5-20 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ ) происходит «подхват» плазменного факела последующими импульсами вплоть до задержек между ними ~50–100 мкс, а также возможен оптический пробой в ионизованных продуктах десорбции при воздействии второго и последующих импульсов даже при допороговых значениях интенсивности излучения (рис. 1) [1].



Рис. 1. Фотохронограмма плазменного факела, возникшего под действием двух лазерных импульсов с задержкой второго на 8 мкс относительно переднего фронта первого

С учетом того что оптический пробой приводит к повреждению поверхности, для лазерной обработки оптических элементов микросекундными импульсами оптимальным является следующий режим:

- плотность энергии лазерного излучения не должна превышать пороговые значения оптического пробоя (для ЦГК  $W \leq 1-3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ );
- продолжительность обработки должна быть не менее 5–6 импульсов;
- интервал следования импульсов должен превышать время, необходимое для разлета ионизованных продуктов десорбции, составляющее не менее 50–100 мкс;
- частота следования импульсов должна быть не более 10 кГц.

Лазерная обработка оптических элементов по данному режиму позволяет повысить порог оптического повреждения поверхности при импульсном облучении до 6–8  $\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ , а срок службы при непрерывном облучении – в 3–5 раз.

Повышения надежности и срока службы силовой ИК-оптики можно добиться также за счет оптимизации конструкции лазерных оптических узлов и снижения неравномерности подводимого к ним лазерного излучения.

Конструкции сегментированного и секционированного лазерных окон позволяют уменьшить величину облучаемого объема оптического элемента в 10–50 раз и за счет этого увеличить его удельную лазерную нагрузку.

При апертуре 30 см девятиэлементное сегментированное окно при вероятности повреждения оптического элемента 0,5 позволило пропускать импульсы лазерного излучения длительностью ~1 мкс с энергией до 5–6 кДж, а одноэлементное – не более 3,5 кДж. По результатам оптимизации конструкции сегментированного лазерного окна разработан и создан технологический ряд окон для апертур от 120 до 450 мм, пропускающих лазерные импульсы с энергией до 25 кДж и средней мощностью до 100 кВт в импульсно-периодическом режиме облучения (рис. 2) [1].

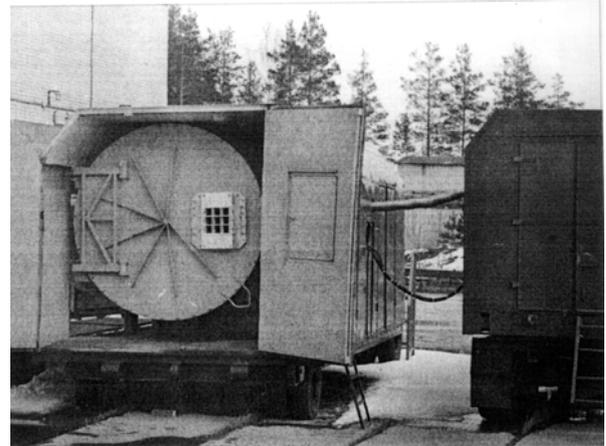


Рис. 2. Сегментированное окно апертурой 450 × 450 мм, установленное на вакуумной камере

Конструкция секционированного окна позволяет ступенчато уменьшать разность давлений на грани оптических элементов за счет промежуточных объемов между оптическими элементами.

Экспериментально установленная зависимость порогов лазерного разрушения от толщины оптического элемента  $h$  при неизменной апертуре свидетельствует, что для  $d = 150 \text{ мм}$  уменьшение  $h$  с 20 до 12 мм позволяет увеличить интенсивность подводимого излучения в 1,4–1,6 раза. Секционированное окно двухкамерного вакуумного стенда (рис. 3) позволило при апертуре 250 мм пропускать излучение с интенсивностью в 1,2–1,5 раза больше, чем однокристальное, без разрушения оптического элемента.

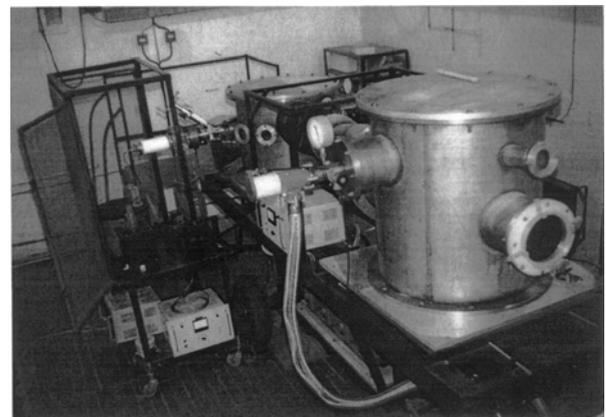


Рис. 3. Двухкамерный вакуумный стенд с секционированным окном

Широкоапертурное лазерное излучение характеризуется наличием так называемых «горячих точек» с аномально высокой интенсивностью, воздействие которых может приводить к локальным повреждениям с катастрофическим разрушением оптического элемента [1]. Поэтому значительного повышения лазерной стойкости и надежности проходной оптики мощных лазеров можно достигнуть за счет повышения качества излучения.

Установлено, что плазменный факел, образующийся вблизи входной грани, экранирует объем и выходную грань оптического элемента от воздействия «горячих точек» [1]. На основе этого разработан способ повышения лазерной стойкости оптического элемента за счет установки перед ним пластины из материала, прозрачного в диапазоне рабочих длин волн лазерного излучения, но отличающегося более низким значением порога оптического пробоя (рис. 4).

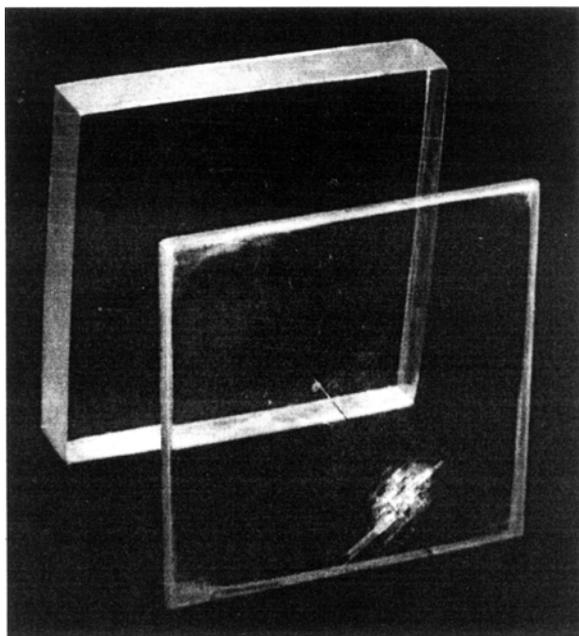


Рис. 4. Оптические элементы апертурой 160 × 160 мм после прохождения через них импульса с  $\tau \sim 1$  мкс и  $W \sim 12$  Дж·см<sup>2</sup>

Порог повреждения оптических элементов может быть повышен на 20–30% за счет «выгорания» на пластине «горячих точек», при этом значительно снижается вероятность их повреждения при допороговой интенсивности лазерного излучения. Кроме того, возможна эксплуатация оптических элементов при  $W$ , в 2–3 раза превосходящих пороговые значения повреждения без риска катастрофического разрушения оптических элементов, что оказывается существенным при проведении работ в условиях высокого вакуума.

Снижения неравномерности широкоапертурного излучения можно добиться, применяя растровые зеркальные системы.

Разработан оптический лазерный узел для ввода мощного широкоапертурного излучения в герметичную камеру, который содержит две растровые зеркальные системы и входное окно в виде собирающей линзы (рис. 5).

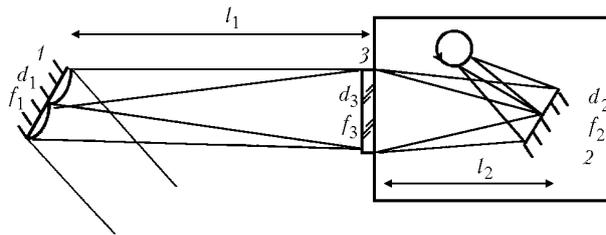
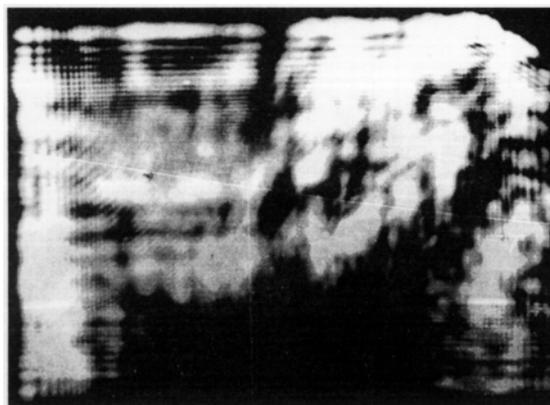
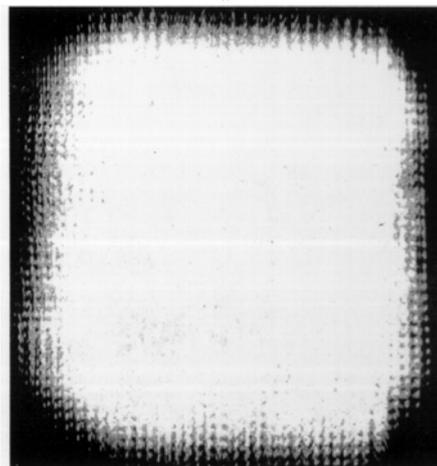


Рис. 5. Двухзеркальный оптический узел для ввода широкоапертурного лазерного излучения в герметичный объем

Первая по ходу лазерного излучения растровая система имеет выпуклые зеркала с фокусными расстояниями  $f_1$  и световым размером  $d_1$ , позволяющие расфокусировать «горячие точки» и сложить изображения зеркал в плоскости входного лазерного окна. Входное окно, имеющее световой размер  $d_3$  и фокусное расстояние  $f_3$ , строит внутри камеры на расстоянии  $l_2$  геометрически подобное изображение первой растровой системы, имеющее световой размер  $d_2$ .



а



б

Рис. 6. Фотоснимки ожогов на калиброванной фотобумаге на входе двухзеркального оптического узла (а) и в плоскости облучаемого объекта (б); размер пятна 30×20 см и 10×10 см соответственно

В плоскость формирования этого изображения устанавливается вторая растровая система, с помощью

которой формируется лазерное излучение в плоскости облучаемого объекта. При этом вторая растровая система может иметь зеркала с любыми фокусными расстояниями  $f_2$ .

Оптическая схема рассчитывается с помощью формулы отрезков параллельной оптики при условии, что угол между осями лазерных пучков, идущих от двух соседних зеркал первой растровой системы, должен быть не более  $4-5^\circ$ , т.е.  $d_1/l_1 \leq 10^{-1}$  рад [1]. Эффективность применения данной схемы иллюстрирует рис. 6.

В зависимости от особенностей эксплуатации оптических элементов увеличение их надежности и срока службы возможно на основе сочетания технологических и конструктивных методов.

Для импульсно-периодического  $\text{CO}_2$ -лазера разработана конструкция окна апертурой  $150 \times 150$  мм с центральной опорой оптического элемента из деформационно-упрочненного КСl, позволившая повысить срок эксплуатации оптических элементов до 2 лет.

Для непрерывных и импульсно-периодических лазеров со средней мощностью излучения 1–10 кВт разработана конструкция универсального лазерного окна с термической насадкой в виде отжиговой печи, позволяющей автоматически регулировать температурный режим, а также производить восстановительный отжиг оптического элемента. Термическая насадка используется в качестве эксикатора-калорифера, что обеспечивает следующие достоинства лазерного окна:

– постоянное нахождение оптического элемента при повышенной температуре исключает возможность адсорбции воды, что снижает поглощение в приповерхностном слое и повышает его лазерную стойкость и срок службы;

– предварительный нагрев оптического элемента и автоматическая регулировка подвода тепла к термической насадке позволяют поддерживать постоянный температурный режим оптического элемента и снижают температурные градиенты в момент подачи и снятия лазерной нагрузки;

– по мере накопления термоиндуцированных напряжений возможно проведение высокотемпературного отжига оптического элемента без его демонтажа.

Такая конструкция позволяет проводить отжиг после каждого рабочего цикла облучения оптического элемента, не доводя величину внутренних напряжений до критических значений, что сокращает длительность выдержки кристалла при высокой температуре до 1–2 ч. Разработан режим циклического отжига, позволяющий снижать величину внутренних напряжений в монокристаллах КСl с 18–24 до 12–14  $\text{кг} \cdot \text{см}^{-2}$ . При этом суммарная продолжительность термической обработки оптического элемента не превышает 6–8 ч, что согласуется с технологическими интервалами большинства производственных процессов. Ресурс оптических элементов из монокристаллов КСl и NaCl в лазерном окне с термической насадкой увеличивается не менее чем на порядок.

1. Казанцев С.Г. Создание проходной оптики мощных ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазеров и методы повышения лазерной стойкости материалов силовой ИК-оптики // Изв. вузов. Физ. 2001. Т. 44. № 11. С. 67–77.
2. Kazantsev S.G. Evolution of alkali-halides defective structure at plastic deformation of large-sized preparations of wide-aperture  $\text{CO}_2$ -lasers windows // SPIE. 1998. V. 3403.0277-786X/98. P. 265–269.
3. Блисталов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000. 432 с.
4. Блисталов А.А., Казанцев С.Г., Кугаенко О.М., Петраков В.С. Термомеханическая обработка щелочно-галогидных кристаллов как способ повышения стойкости к воздействию мощного импульсного лазерного излучения // Изв. вузов. Матер. электрон. техн. 2001. № 4. С. 42–45.
5. Блисталов А.А., Казанцев С.Г., Кугаенко О.М. Лазерная стойкость деформационно-упрочненных щелочно-галогидных кристаллов // Изв. вузов. Матер. электрон. техн. 1998. № 4. С. 20–23.
6. Казанцев С.Г. Лазерный отжиг элементов проходной оптики широкоапертурных  $\text{CO}_2$ -лазеров // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 11. С. 1353–1355.

**S.G. Kazantsev. Laser firmness of perspective materials of IR optics. Part 2. Methods to improve laser firmness and service life of optical elements.**

Systematization of types and conditions for appearance IR material damages in wide-aperture laser beams based on the results of previous experimental investigations has allowed creation of a technological series of windows for  $\text{CO}_2$  lasers with the output energy up to 25 kJ in the pulsed mode and the mean output power up to 100 kW in the repetitively pulsed mode. Technological and design methods have been developed to improve the laser firmness of IR materials.