

Параметры термической стабильности охлаждаемых оптических элементов

В.В.Аполлонов, А.М.Прохоров, В.А.Шмаков

Рассмотрено влияние теплоносителя на термическую стабильность охлаждаемых оптических элементов. Предложен новый параметр стабильности, содержащий характеристики системы охлаждения оптических элементов и теплоносителя.

Ключевые слова: оптические элементы, теплообмен, параметры стабильности.

Одним из основных требований к материалам оптических элементов является сохранение их оптических характеристик. Оценка обычно ведётся по таким характеристикам, как коэффициент отражения, коэффициент рассеяния, комплексный показатель преломления, коэффициент термического расширения, плотность, теплопроводность, удельная теплоёмкость, температура плавления.

Не менее важными характеристиками являются также: механические – модуль упругости, предел прочности, микропластичность, предел текучести, твёрдость, ковкость;

металлографические – кристаллическая структура, величина зерна, температура рекристаллизации, температура снятия напряжения, текстура, вид термообработки, наличие второй фазы, пор, примесей;

технологические – возможность механической обработки, полировки, нанесения покрытий.

Недостатком обычно применяемых в мощных лазерах и в астрономии оптических элементов, изготовленных из меди, стеклокерамики, плавленого кварца, ситалла [1–3] и др., является их высокий коэффициент термического расширения или низкая теплопроводность, поэтому они не могут эффективно использоваться в условиях интенсивных световых потоков, быстрого изменения температуры внешней среды. Кроме того, увеличение их размеров при условии сохранения начальной формы оптической поверхности под действием гравитационных сил и термических напряжений влечёт за собой резкое возрастание массы. Традиционные конструкции указанных выше оптических элементов и технологические особенности их изготовления не позволяют существенно снизить вес, создать эффективную систему охлаждения и термостабилизации.

В настоящей работе показано, что стабильность охлаждаемых оптических элементов в значительной мере зависит от параметров, включающих в себя характеристики теплоносителя и теплообменника.

Термическая стабильность оптических элементов в зависимости от условий их теплового нагружения определяется рядом параметров [4–6].

По признаку достижения на отражающей поверхности критической температуры T_c параметры стабильности материалов оптических элементов для непрерывного и импульсного режимов работы лазера имеют вид

$$\max\{\lambda T_c\}, \quad \max\{(\lambda c \rho)^{1/2} T_c\},$$

где c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность материала. В зависимости от конкретных условий критическая температура имеет свой физический смысл. Это может быть температура начала процесса рекристаллизации, фазовых переходов, и т. п. Здесь и далее «max» означает максимально допустимое значение данного параметра для выбранного материала, при котором ещё сохраняется оптическая работоспособность элемента.

Часть поглощённой оптической поверхностью излучения, превращаясь в тепло, создаёт в материале тепловые потоки. При этом возникающее в оптическом элементе неоднородное распределение температуры приводит к появлению термических напряжений. Если создаваемые тепловыми потоками максимальные касательные напряжения превышают предел микротекучести материала, то происходят необратимые структурные изменения. Соответствующие параметры стабильности материала по признаку появления на оптической поверхности пластических деформаций для двух режимов работы лазера имеют вид

$$\max\left\{\frac{\lambda \sigma_0}{\beta E}\right\}, \quad \max\left\{\frac{(\lambda c \rho)^{1/2} \sigma_0}{\beta E}\right\},$$

где σ_0 – предел микротекучести; β – коэффициент термического расширения; E – модуль Юнга.

Величины σ_0 и E следует рассматривать совместно, поскольку высокий уровень температурных напряжений $\sim \beta E / \lambda$ может не приводить к появлению структурных изменений в материале, если предел микротекучести достаточно высок. Для хрупких материалов в качестве величины σ_0 следует рассматривать напряжение хрупкого

разрушения или начала развития микротрещин. Пластичные материалы характеризуются величиной остаточной деформации, приводящей к ухудшению оптических свойств отражающей поверхности. Предельное напряжение σ_0 в этом случае определяется экспериментально (обычно выбирается напряжение, после снятия которого имеет место остаточная деформация, равная 0.01). Для импульсно-периодического режима работы лазера необходимо учитывать усталостное повреждение материала.

Термоупругое искажение отражающей поверхности оптических элементов считается одной из основных характеристик и в значительной мере определяет качество лазерного излучения. Параметры стабильности материала по признаку достижения предельного искажения оптической поверхности для непрерывного и импульсного режимов работы лазера могут быть получены на основе решения модельных задач термоупругости

$$\max \left\{ \frac{\beta}{\lambda} \right\}, \quad \max \left\{ \frac{\beta}{c\rho} \right\}.$$

Для каждого режима работы существует наиболее «жёсткий» параметр стабильности, ограничивающий использование материалов в оптических элементах. При непрерывном режиме работы существенным является параметр, который описывает термоупругое искажение оптической поверхности, а также другой, ответственный за появление пластических деформаций. В импульсных лазерах это достижение на оптической поверхности критической температуры и условий образования плазмы. По мере уменьшения длительности импульса при сохраняющемся энерговкладе весомую роль приобретают параметры, описывающие плавление материала, испарение, появление приповерхностной плазмы. Если длительность импульса составляет $\sim 10^{-9}$ с и менее, то существенными становятся динамические эффекты. В этом случае необходимо учитывать скорость упругих волн и конечность скорости распространения тепла.

Некоторые требования, предъявляемые к охлаждаемым оптическим элементам, могут носить взаимоисключающий характер. Сюда относятся, например, параметры стабильности, определяемые предельным тепловым потоком и предельным термическим искажением оптической поверхности. Уменьшение термических деформаций оптических элементов, вытекающее из требований их оптической работоспособности, при оптимизации конструкции связано с появлением дополнительных напряжений, которые препятствуют искажению оптической поверхности. Это приводит к снижению предельных тепловых потоков, при которых происходит её пластическая деформация. Кроме того, повышение эффективности системы охлаждения путём уменьшения размеров отдельных элементов теплообменника ведёт к снижению прочности лазерных зеркал.

Выбор параметров стабильности оптических элементов для лазеров непрерывного действия с развитой системой охлаждения связан с особенностями теплообмена, зависящими от конструкции теплообменника и характеристик теплоносителя, которые могут значительно изменить характер деформирования.

Температурное поле охлаждаемого оптического элемента носит ярко выраженный неоднородный характер. Основной перепад температуры здесь осуществляется в

тонком приповерхностном слое, включающем в себя отражающую пластину и теплообменник. Теплообмен происходит за счет теплопередачи, а коэффициент теплопроводности играет меньшую роль, чем в неохлаждаемых оптических элементах.

На рис. 1 приведена зависимость искажений отражающей поверхности оптического элемента от теплопроводности, полученная расчётным путём [7] для охлаждаемого оптического элемента с характерным размером 500 мм при $\beta = 1.7 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ (медь). Как видно из рис. 1, зависимость искажений отражающей поверхности охлаждаемого оптического элемента $W = W(\lambda)$ существенно отклоняется от известного закона

$$W \propto \beta/\lambda.$$

При теплопроводностях, превышающих $100 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, W изменяется мало. Например, при увеличении λ от 100 до $400 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ значение W уменьшается всего на 27 %, т. е. в этой области большую роль при выборе материала охлаждаемого оптического элемента играет коэффициент термического расширения. Как показывает анализ, не менее важную роль здесь играет также выбор теплоносителя.

Для выяснения этой зависимости рассмотрим следующую задачу. Пусть имеется оптический элемент, состоящий из тонкой отражающей пластины толщиной h и массивной основы, между которыми расположен теплообменник. Теплофизические характеристики теплообменника описываются теплопроводностью λ_p , объёмным коэффициентом теплоотдачи α_v и пористостью P . Будем считать, что тепло сосредоточено только в отражающей пластине и в части теплообменника, к ней прилегающей. Основа зеркала при этом остается теплоизолированной.

Искажения отражающей поверхности в этом случае вызываются тепловым расширением отражающей пластины, в которой температура распределена линейно, и разогретой части слоя теплообменника, где температура распределена экспоненциально. Тогда с учётом сделанных предположений искажение отражающей поверхности выражается как

$$W_n \approx \beta \left[\frac{1}{\alpha_v} + \frac{h}{(\alpha_v \lambda_p)^{1/2}} + \frac{h^2}{2\lambda} \right]. \quad (1)$$

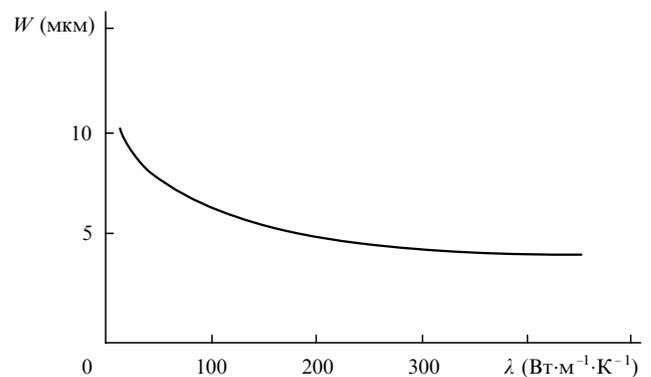


Рис. 1. Зависимость термических искажений отражающей поверхности от теплопроводности материала охлаждаемого оптического элемента.

Первое слагаемое в полученном выражении соответствует деформации слоя охлаждения, второе и третье – расширению отражающей пластины.

Воспользовавшись аналитическим решением для изгиба оптического элемента, можно показать, что деформации изгиба

$$W_b \approx \beta \frac{h}{(\alpha_v \lambda_p)^{1/2}} \quad (2)$$

Суммарное искажение оптической поверхности представим в следующем виде:

$$W = W_n + W_b \quad (3)$$

Введём безразмерный параметр

$$k = \frac{h}{2} \left(\frac{\alpha_v}{\lambda_p} \right)^{1/2}$$

В пористой среде коэффициент теплопроводности λ_p можно выразить через пористость и теплопроводность исходного материала

$$\lambda_p = \lambda(1 - P)$$

Тогда

$$W \approx \frac{\beta}{\alpha_v} [1 + 4k + 2k^2(1 - P)] \quad (4)$$

Коэффициент теплопроводности входит в (4) неявно через параметр k . Объёмный коэффициент теплоотдачи учитывает свойства теплоносителя и конструктивные особенности теплообменника. Таким образом, параметр стабильности охлаждаемых оптических элементов зависит не только от коэффициентов теплопроводности и термического расширения материала. Существенными являются также конструктивные особенности оптического элемента и характеристики теплоносителя.

Из выражения (4) следует, что с уменьшением толщины отражающей пластины параметр стабильности перестает зависеть от теплопроводности материала и при $h = 0$ определяется только отношением коэффициента термического расширения материала к объёмному коэффициенту теплоотдачи

$$W \approx \beta/\alpha_v$$

При больших k параметр становится пропорциональным β/λ , т. е. известному соотношению.

В табл.1 сравниваются некоторые материалы, которые предлагается применять при создании оптических элементов. Плотность светового потока и конструкция оптического элемента выбраны такими, что термическое искажение отражающей поверхности в пределах светового пятна ε_T для оптических элементов из меди с микроканальной системой охлаждения близко к 1 мкм. Выбор необходимого материала при создании лазерных оптических элементов зависит от их назначения. Кроме того, в табл.1 представлены прогиб под собственным весом E/ρ , максимальная температура ΔT_{max} на отражающей поверхности при указанных выше световой нагрузке и конструкции оптического элемента, а также плотность теплового потока $\sigma_T/(E\beta\Delta T_{max})$ (σ_T – предел текучести материала оптического элемента) на отражающей поверхности, которая может привести к пластической деформации материала оптического элемента.

Малогабаритные оптические элементы, используемые на участках оптического тракта с малой апертурой и высокой плотностью светового потока, работают в условиях интенсивного теплообмена, а в приповерхностной области развиваются значительные перепады температур. Здесь наиболее подходящими являются материалы на основе тугоплавких металлов – вольфрама и молибдена.

Как видно из табл.1, термоупругие деформации отражающей поверхности оптических элементов зеркал из вольфрама и молибдена в ~ 2.5 раза ниже деформаций зеркал из меди. Кроме того, вольфрам из-за высокого предела текучести выдерживает более высокие плотности теплового потока (см. табл.1), чем молибден и медь.

Оптические элементы лазерных технологических комплексов, входящие в систему фокусировки, как правило, относятся к участкам оптического тракта с большой апертурой. Плотности светового нагружения здесь невысоки (при сохраняющейся интегральной мощности пучка), а температура отражающей поверхности на порядок ниже, чем в высоконагруженных резонаторных элементах. Это позволяет использовать в качестве материала таких оптических элементов инвар, сохраняющий

Табл.1.

Материал	λ (Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹)	β (10 ⁶ К ⁻¹)	E (10 ⁻¹⁰ н/м ²)	σ_T (10 ⁻⁷ н/м ²)	ρ (10 ⁻³ кг/м ³)	ε_T (мкм)	E/ρ (10 ⁻⁷ м ² /с ²)	ΔT_{max} (К)	$\sigma_T/(E\beta\Delta T_{max})$ (10 ⁻³)
Медь деформированная	400	17.4	11.2	6.85	8.93	1.02	1.25	12.5	2.8
Вольфрам	160	4.5	40	29.4	19.1	0.36	2.1	22.2	9.3
Молибден	130	5.2	31	10.8	9.01	0.40	3.4	19.7	2.7
Нержавеющая сталь	20	16.6	20.0	23.5	7.85	1.9	2.55	79.9	0.87
Никель	92	13.3	20.2	20.5	8.90	1.13	2.27	26.0	2.9
Алюминий	211	24.5	6.85	6.44	2.70	1.77	2.54	17.2	2.2
Титан	15.5	8.5	10.9	7.5	4.54	1.06	2.42	101	0.8
Бериллий	182	13.7	33	–	1.85	1.03	17.8	18.4	–
Инвар	11	1.6	14.7	–	8.00	0.22	1.84	145	8.00
Кремний	140	3.0	11.3	–	2.42	0.24	4.67	21.5	–
Карбид кремния	110	3.3	39.2	–	3.2	0.28	12.2	25	–

свои физико-механические характеристики только в определенном диапазоне температур, близких к комнатным [7]. Перспективными материалами для создания таких оптических элементов являются также кремний, карбид кремния и композиционные материалы на их основе [8, 9].

Таким образом, термическая стабильность охлаждаемых оптических элементов мощных технологических лазерных комплексов существенно зависит от параметров теплоносителя, которые наряду с теплопроводностью, коэффициентом термического расширения, теплоёмкостью материалов оптических элементов в значительной мере определяют термические деформации охлаждаемых оптических элементов.

1. Аполлонов В.В., Барчуков А.И., Карлов Н.В. и др. *Письма в ЖТФ*, **1**, 522 (1975).
2. Tebo A. *Laser Focus*, **6**, 72 (1988).
3. Ratmann C.L., Mann J.H., Nordberg M.F. *Appl. Opt.*, **7**, 819 (1968).
4. Родкевич Г.В., Робачевская В.И. *Опт.-мех. пром.*, **9**, 3 (1977).
5. Аполлонов В.В., Прохоров А.М., Хомич В.Ю., Четкин С.А. *Квантовая электроника*, **8** (10), 2208 (1981).
6. Максудов Д.Д. *Изготовление и исследование астрономической оптики* (М.: Наука, 1984, с. 25).
7. Аполлонов В.В., Прохоров А.М., Шмаков В.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **16**, 79 (1990).
8. Аполлонов В.В., Гартман М.В., Шмаков В.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **17**, 40 (1991).
9. Аполлонов В.В., Бабаянц Г.И., Шмаков В.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **16**, 83 (1990).



Заседание редколлегии «ЖЭТФ» (1973 г). Слева направо: З.П.Бунакова, Е.М.Лифшиц, А.М.Прохоров, М.А.Леонтович, П.Л.Капица, Э.Л.Андроникашвили, В.П.Джелепов.