

Компенсация динамических термодформаций зеркал мощных слэб-лазеров

А.Ю.Родионов, В.В.Сергеев, А.А.Смирнов, А.В.Старовойтов, В.Е.Шерстобитов

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование системы компенсации термодформаций резонаторных зеркал мощных CO₂-слэб-лазеров на основе профилированного подогрева обратной стороны зеркала. Показано, что использование такого подогрева резонаторного зеркала позволяет свести к минимуму динамические искажения волнового фронта выходного пучка в условиях варьирования мощности генерации лазера.

Ключевые слова: термодформации, слэб-лазеры, охлаждаемые зеркала, угловая расходимость, компенсация аберраций.

1. Введение

Наиболее существенными параметрами технологических волноводных CO₂-слэб-лазеров являются угловая расходимость и стабильность диаграммы направленности выходного излучения. С ростом мощности лазера достижение необходимых угловых параметров пучка оказывается сложной задачей. Одна из основных причин ухудшения направленности излучения – термодформации лазерной оптики.

В газовых слэб-лазерах активная среда располагается между двумя протяженными пластинами (рис.1), обеспечивающими охлаждение газовой смеси. В большинстве случаев эти же пластины используются в качестве электродов, с помощью которых осуществляется возбуждение активной среды электрическим разрядом. Чтобы достичь высокой эффективности диффузионного охлаждения, пластины располагают на незначительном (несколько миллиметров) расстоянии друг от друга. Большой объем активной среды (а следовательно, и мощность лазера) достигается путем увеличения как продольных (по отношению к оси пучка), так и поперечных размеров охлаждающих пластин. Поэтому поперечное сечение активной среды в таких лазерах представляет собой прямоугольник с существенно различными длинами сторон. В направлении, перпендикулярном плоскости охлаждающих элементов, пучок ограничен зазором, размеры которого не превышают нескольких миллиметров (2–4 мм). В направлении вдоль зазора $X'X$ апертура пучка в мощных лазерах может достигать десятков сантиметров.

Для формирования излучения в таких лазерах широко используются так называемые гибридные резонаторы [1]. В направлении, перпендикулярном охлаждающим элементам, резонатор, как правило, делается устой-

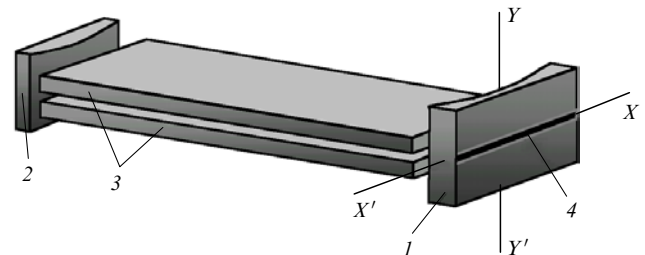


Рис.1. Схема газового слэб-лазера с неустойчивым резонатором: 1, 2 – зеркала резонатора; 3 – элементы охлаждения активной среды; 4 – область профилированного подогрева зеркала резонатора.

чивым или плоскопараллельным. В этом направлении осуществляется либо волноводный режим распространения излучения (в этом случае охлаждающие элементы выполняют роль волновода), либо режим, при котором излучение удерживается в промежутке между пластинами за счет каустики моды устойчивого резонатора.

В направлении $Y'Y$ выходной пучок имеет большую дифракционную расходимость ($\theta \sim 10^{-2}$ рад) и термические искажения зеркал обычно не оказывают значительного влияния на его угловые характеристики. Ситуация принципиально меняется вдоль направления $X'X$. В этом направлении резонатор имеет большое число Френеля и типичные термоискажения резонаторной оптики могут существенно влиять на угловую расходимость выходного пучка. Для формирования одномодового режима генерации в указанном направлении чаще всего используется неустойчивый резонатор. При этом из-за сравнительно невысокого коэффициента усиления активной среды ($k_0 \sim 0.5 - 0.7 \text{ м}^{-1}$) [2] коэффициент увеличения M таких резонаторов обычно не превышает 1.3. Как известно, неустойчивые резонаторы с малым увеличением обладают высокой чувствительностью к внутрирезонаторным искажениям [3], поэтому реальные термодформации зеркал лазера могут приводить к заметному ухудшению угловых характеристик выходного излучения.

Установлено, что доминирующими искажениями, возникающими вследствие термодформации оптики в слэб-лазерах, являются аберрации типа дефокусировки, которые приводят к появлению дополнительной кривиз-

А.Ю.Родионов, В.В.Сергеев, А.А.Смирнов, А.В.Старовойтов, В.Е.Шерстобитов. ФГУП «НИИ лазерной физики», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12; тел.: (812) 328 57 34, (812) 328 44 60 доб. 232, факс: (812) 328 58 91

ны волнового фронта излучения вдоль неустойчивой координаты. Однако на практике такого рода искажения, помимо дефокусировки пучка, вызывают также угловое смещение выходного пучка излучения. Это связано с тем, что в мощных слаб-лазерах используется, как правило, односторонний вывод излучения (рис.2), при котором пучок выводится из неустойчивого резонатора вблизи одного из краев выходного зеркала. При использовании такой схемы резонатора возникновение дополнительной кривизны волнового фронта выходного пучка ρ^{-1} вызывает его смещение на угол $\Delta\alpha = \rho^{-1}b$ относительно направления распространения пучка идеального резонатора, задаваемого углом α_{out} (здесь b – расстояние от оси резонатора до геометрического центра сечения выходного пучка (рис.2)). В этой ситуации при больших b даже небольшая деформация зеркал резонатора может приводить к существенным (по сравнению с дифракционным углом) угловым отклонениям пучка. Очевидно, что в случае технологических лазеров, для которых характерны режимы работы с меняющейся во времени мощностью генерации, термдеформации зеркал будут приводить к неустойчивости диаграммы направленности выходного пучка, достигающей на практике долей дифракционного угла. Такое ухудшение угловых характеристик излучения мощных слаб-лазеров является неприемлемым для целого ряда применений.

Одним из естественных способов снижения уровня термдеформаций зеркал является нанесение на их зеркальную поверхность высокоотражающих покрытий. Однако такой подход приводит к заметному удорожанию резонаторной оптики и на практике оказывается малоэффективным из-за деградации покрытий при длительной работе лазера.

В связи с этим обычно для снижения уровня термдеформаций оптики в мощных CO_2 -слаб-лазерах используют специальные системы охлаждения зеркал. Как правило, эти системы организуются таким образом, чтобы в стационарном режиме работы обеспечить максимально эффективный теплоотвод с поверхности зеркала. Однако из-за конечного расстояния между поверхностью зеркала и каналами охлаждения в зеркале неизбежно возникает градиент температурного поля, направленный перпендикулярно отражающей поверхности, который приводит к ее термдеформации. Ситуация еще более усложняется при нестационарном режиме работы лазера, когда инерционная система охлаждения не успевает отслеживать изменения мощности тепловыделения на поверхности зеркала.

В [4] был предложен достаточно простой подход к решению проблемы термдеформаций зеркал слаб-лазе-

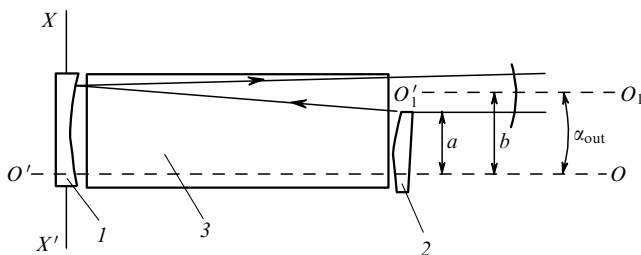


Рис.2. Оптическая схема неустойчивого резонатора с односторонним выводом излучения: 1, 2 – зеркала резонатора; 3 – активная среда; $O'O_1$ – оптическая ось резонатора; O_1O_1 – оптическая ось выходного пучка.

ров, основанный на компенсации термического изгиба зеркала за счет профилированного подогрева (так называемого контрподогрева) его обратной стороны. Очевидно, что если обеспечить полную симметрию температурного поля относительно плоскости симметрии зеркала, параллельной его отражающей поверхности, можно полностью исключить изгиб зеркала как целого при лучевой нагрузке, в том числе и в нестационарном режиме. Такая симметрия нагрева зеркала может быть достигнута, например, в том случае (см. рис.1), когда геометрия источника тепловыделения полностью повторяет геометрию сечения пучка на отражающей поверхности, а величина и временная зависимость его мощности точно воспроизводят динамику поглощенной мощности лазерного пучка.

Во избежание перегрева зеркало должно быть снабжено также симметричной системой теплоотвода, расположенной, например, с торцов зеркала, параллельных направлению, в котором резонатор является неустойчивым. Очевидно, что требования к такой системе охлаждения могут быть существенно снижены по сравнению с требованиями к аналогичным системам обычных охлаждаемых зеркал. Действительно, от такой системы уже не требуется обеспечения максимального теплоотвода при малой инерционности, она должна лишь не нарушать симметрию температурного поля зеркала относительно оси $X'X$. В этих условиях конструкция системы охлаждения может быть предельно простой.

Еще одним важным преимуществом такого подхода является возможность активного управления изгибом зеркала. Регулируя мощность контрподогрева одного из зеркал резонатора, можно управлять кривизной волнового фронта выходного пучка лазера. Такая внутрирезонаторная адаптивная система может включать в себя всего лишь одно подогреваемое зеркало. Система охлаждения остальных зеркал может быть предельно упрощена либо исключена вовсе. Это значительно уменьшит общую стоимость зеркал, особенно в случае многопроходных систем.

К сожалению, авторам неизвестны какие-либо публикации, посвященные реализации данного метода компенсации термдеформаций зеркал. В данной работе описана конструкция зеркала с контрподогревом и проведено экспериментально-теоретическое исследование его работы, подтверждающее эффективность предложенного в [4] подхода.

2. Конструкция резонаторного зеркала с контрподогревом

В [4] предложено несколько вариантов реализации контрподогрева зеркала. Нами был создан макет зеркала с компенсацией термоаббераций, основанный на использовании электрического контрподогрева. Такое зеркало оказывается наиболее простым в конструктивном отношении, поскольку не требует для своей реализации ни дополнительных электродных систем для возбуждения высокочастотного разряда, ни специальной формирующей оптики, обеспечивающей засветку обратной стороны резонаторного зеркала [4].

В зеркалах реальных слаб-лазеров тепловыделение при лучевой нагрузке происходит в узкой полоске шириной порядка 2–4 мм. Протяженность этой полоски вдоль поверхности электродов для типичных технологических

лазеров, как правило, пропорциональна мощности лазера. В связи с этим удельная лучевая нагрузка на зеркала резонатора (т.е. мощность, приходящаяся на единицу длины зеркала) меняется мало для лазеров с различной мощностью и, например, для CO_2 -лазеров составляет $\sim 0.5\text{--}1$ кВт/см. При коэффициенте отражения зеркала $R \sim 98\%$ удельная мощность тепловой нагрузки может достигать $\sim 10\text{--}20$ Вт/см. Таким образом, для создания симметричного температурного поля нагревательный элемент, обеспечивающий контрподогрев зеркала, должен обладать примерно такими же удельными мощностями тепловыделения на единицу длины.

Эксперименты проводились с медным зеркалом размером 80×60 мм и толщиной 15 мм, изображенным на рис.3. В качестве простейших нагревательных элементов, обеспечивающих контрподогрев зеркала, нами использовались стандартные керамические сопротивления 2, представляющие собой графитосодержащий стержень 4, окруженный изолирующей керамической оболочкой. Для обеспечения хорошего теплоотвода на обратной стороне зеркала был выполнен специальный паз, в который вставлялись соединенные последовательно сопротивления. В такой схеме удается в три раза увеличить площадь контакта нагревательного элемента с зеркалом по сравнению со схемой, в которой сопротивления располагаются на поверхности зеркала. Проведенные предварительные испытания показали, что данная конструкция системы подогрева позволяла обеспечить длительный нагрев зеркала при мощности тепловыделения до 200 Вт без разрушения сопротивлений. Таким образом, в экспериментах удавалось реализовать удельную мощность контрподогрева вплоть до 25 Вт/см.

Для моделирования тепловых лучевых нагрузок, характерных для реальных мощных CO_2 -слаб-лазеров, на отражающую поверхность зеркала $A'B'C'D'$ вдоль оси симметрии $X'X$ наносилось поглощающее графитовое покрытие 3 в виде полоски шириной 4 мм. Излучение сравнительно маломощного CO_2 -лазера (см. ниже) практически полностью поглощалось покрытием, вызывая деформацию зеркала, типичную для мощных лазеров.

Теплоотвод от исследуемого зеркала был организован с торцов $ABB'A'$ и $DCC'D'$ (рис.3), параллельных оси симметрии $X'X$. В качестве теплоотводящих элементов использовались медные трубки с проточной водой

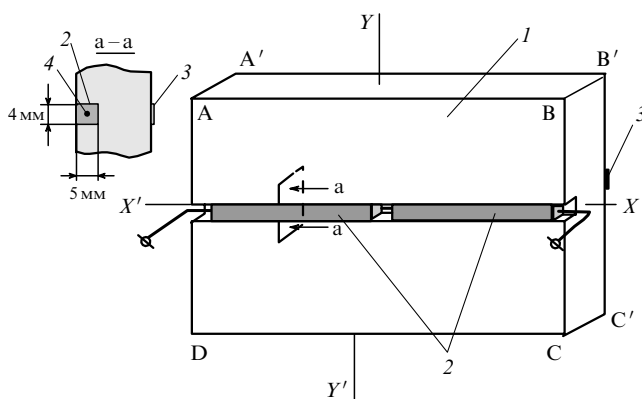


Рис.3. Конструкция зеркала с контрподогревом: 1 – медное зеркало с отражающей поверхностью $A'B'C'D'$; 2 – нагревательные резисторы; 3 – поглощающее покрытие на отражающей поверхности зеркала; 4 – графитосодержащий стержень нагревательных элементов.

(на рис.3 не показаны), которые для улучшения теплового контакта прижимались к торцам зеркала через теплопроводящую пасту.

3. Схема экспериментальной установки и методика измерений

Схема экспериментальной установки изображена на рис.4. Для моделирования лучевой тепловой нагрузки использовался непрерывный CO_2 -лазер 1 с максимальной мощностью 100 Вт, излучающий пучок с круглым сечением диаметром ~ 15 мм.

Сферическим зеркалом 3 излучение лазера фокусировалось на поверхности испытуемого зеркала 5. На пути сходящегося пучка располагалась непросветленная цилиндрическая линза 4. Положение и ориентация этой линзы выбирались таким образом, чтобы сформировать в плоскости зеркала 5 пучок с сечением в виде узкой полоски шириной ~ 3 мм и протяженностью 80 мм. Такая форма сечения пучка соответствовала характерному профилю интенсивности излучения на резонаторных зеркалах слаб-лазеров.

При надлежащей юстировке зеркала 3 и линзы 4 лазерный пучок практически полностью попадал на поглощающее покрытие. В результате от зеркала 5 отражалось не более 5% мощности падающего излучения CO_2 -лазера. Таким образом, на прямоуглом участке зеркала размером 80×3 мм удавалось создать суммарную тепловую нагрузку более 60 Вт, что соответствовало удельному тепловыделению ~ 7.5 Вт/см.

Для регистрации профиля отражающей поверхности зеркала 5 использовался интерферометр Майкельсона (элементы 8, 9, 10 и 5 на рис.4), совмещенный с ПЗС-камерой 11. Система регистрации позволяла получать интерферограммы поверхности зеркала с временным разрешением 0.6 с. Поскольку в области поглощающего покрытия интерференционные полосы на интерферограммах отсутствовали, расшивка проводилась вдоль сечения, параллельного оси зеркала $X'X$ и смещенного относительно нее на 4 мм.

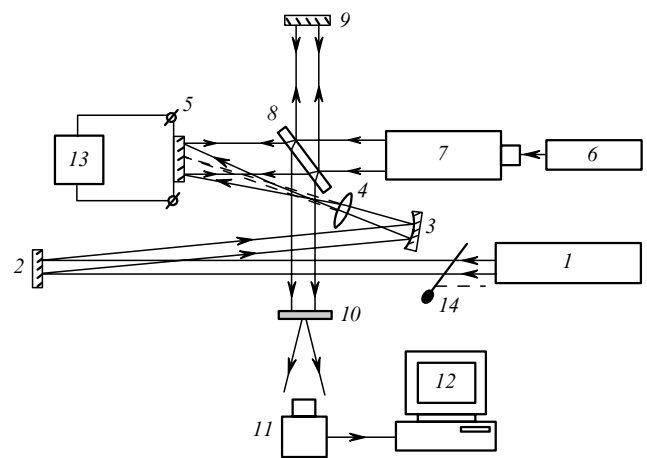


Рис.4. Оптическая схема эксперимента: 1 – лазер ИЛГН-704 ($\lambda = 10.6$ мкм); 2 – плоское зеркало; 3 – фокусирующее зеркало; 4 – цилиндрическая линза; 5 – испытуемое зеркало; 6 – лазер ЛГ-126 ($\lambda = 0.63$ мкм); 7 – коллиматор с апертурой 150 мм; 8 – делительная пластина интерферометра; 9 – опорное зеркало интерферометра; 10 – матовый экран; 11 – ПЗС-камера; 12 – компьютер; 13 – источник питания; 14 – затвор.

Термоискажения профиля зеркала рассчитывались как разность волновых фронтов зондирующего излучения, полученных до и во время теплового воздействия на зеркало. Из найденного таким образом разностного фазового профиля зеркала затем вычиталась линейная составляющая, соответствующая клиновым фазовым искажениям, связанным с вибрациями стенда.

Для оценки точности методики расшифровки на рис.5,а (зависимости, отвечающие моменту времени $t = 0.6$ с) штриховой кривой приведена зависимость от x остаточной деформации зеркала, соответствующий обработке двух интерферограмм, полученных в разные моменты времени в отсутствие теплового воздействия на зеркало. Видно, что амплитуда ошибки обработки интерферограмм не превышает 0.1 мкм.

4. Результаты экспериментальных исследований термодформаций зеркала

На рис.5,а представлены результаты измерения динамики изгиба зеркала при воздействии на него лазерного излучения с эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт. Такую тепловую нагрузку создавал бы пучок мощностью 3 кВт при коэффициенте отражения зеркала $R = 98\%$. Данные получены в отсутствие контрподогрева зеркала электрическим током. Момент времени $t = 0$ соответствовал открытию затвора 14 (рис.4) и подаче на зеркало лазерного пучка. Расход воды, охлаждающей зеркало, составлял 1 л/мин.

Из представленных результатов видно, что уже после 1–2 с изгиб зеркала достигает своего стационарного положения и в дальнейшем меняется весьма мало. Некоторое отклонение закона деформации поверхности зеркала от параболического объясняется довольно сложной пространственной структурой пучка излучения многомодового CO_2 -лазера, которая в сечении зеркала имела не прямоугольный, а близкий к параболическому профиль. Максимальная стрела прогиба зеркала на расстоянии 60 мм от его центра Δ_{60} составляла примерно 0.5 мкм, что соответствует амплитуде фазовых искажений $\lambda/10$ для рабочей длины волны $\lambda = 10.6$ мкм.

На первый взгляд, такая незначительная амплитуда крупномасштабных фазовых искажений не должна вызывать существенного ухудшения угловых характеристик лазерного пучка. Однако оценки показывают, что, например, для двухзеркального неустойчивого резонатора с увеличением $M = 1.2$ и шириной активной среды $aM = 8$ см такие искажения будут приводить к отклонению выходного пучка на угол, составляющий 80% от его дифракционного угла $\alpha_d = 2\lambda/[a(M-1)]$. Такое отклонение пучка, как правило, является недопустимым для технологических лазеров.

На рис.5,б показана динамика профиля $\Delta(x)$ отражающей поверхности зеркала при его подогреве с обратной стороны в отсутствие теплового воздействия лазерного излучения. Результаты приведены для мощности электрического подогрева зеркала $P_R = 90$ и 180 Вт. Из приведенных данных видно, что при электрическом подогреве обратной стороны зеркало приобретает дополнительную вогнутость, т.е. термодформации имеют противоположный знак по сравнению с их знаком при изгибе зеркала при облучении его отражающей поверхности лазерным пучком. При этом стрела прогиба, соответствующая стреле, возникающей при облучении зер-

кала светом с эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт, достигается при мощности электрического нагрева, примерно в три раза превышающей мощность поглощенного лазерного излучения, т.е. при $P_R = 180$ Вт.

На рис.5,б приведены результаты измерения динамики профиля отражающей поверхности зеркала при воздействии на него лазерным излучением ($P_L = 60$ Вт) с одновременным контрподогревом. Мощность контрподогрева P_R была равна 180 Вт и подбиралась таким образом, чтобы свести к минимуму величину деформации поверхности зеркала в стационарном режиме. В первую секунду после начала облучения зеркала наблюдается некоторая регулярная составляющая аберраций, свидетельствующая о его изгибе. Такое поведение зеркала объясняется инерционностью нагревательного элемента, выполненного в виде керамических сопротивлений. В дальнейшем искажения не превышают $\lambda/100$, что соответствует точности расшифровки интерферограмм (см. рис. 5,а, $t = 0.6$ с).

Таким образом, использование контрподогрева позволило снизить амплитуду термодформаций зеркала по крайней мере в пять раз. Остаточные искажения настолько малы, что не должны существенно сказываться на угловых характеристиках выходного пучка лазера с неустойчивым резонатором.

Следует отметить, что для полной компенсации термоаббераций пришлось почти в три раза увеличить мощность контрподогрева по сравнению с эквивалентной тепловой мощностью лазерного пучка. Для объяснения причины возникновения такого дисбаланса мощностей мы провели численное моделирование термодформаций исследуемого зеркала.

5. Численное моделирование термодформаций зеркала и обсуждение результатов

Расчет деформаций зеркала проводился на основе метода конечных элементов. Созданная объемная модель полностью повторяла конструкцию исследуемого зеркала. На первом этапе численного моделирования рассчитывалось нестационарное температурное поле в объеме зеркала, на основании которого на следующем шаге моделирования определялось искомое поле термодформаций. Нагрев зеркала лазерным излучением моделировался путем задания на отражающей поверхности зеркала источника тепловыделения в виде полоски шириной 3 мм. Вдоль направления $Y'Y$ распределение тепловыделения считалось однородным, а в направлении $X'X$ оно задавалось функцией $Q(x)$, описывающий неоднородный профиль лазерного пучка. Электрический подогрев зеркала моделировался в виде однородно распределенного поверхностного источника тепловыделения, локализованного на трех гранях паза на обратной стороне зеркала (рис.3). Размеры паза составляли 4×5 мм и определялись размерами сопротивлений, использовавшихся в опытах.

Охлаждение зеркала описывалось в приближении постоянной температуры торцов зеркала, которая считалась равной температуре охлаждающей проточной воды $T = 10^\circ\text{C}$, измеренной в экспериментах. При этом тепловой поток был пропорционален коэффициенту теплоотдачи α_T , который для медных трубок охлаждения составлял $4000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ [5]. Теплообмен с окружающим

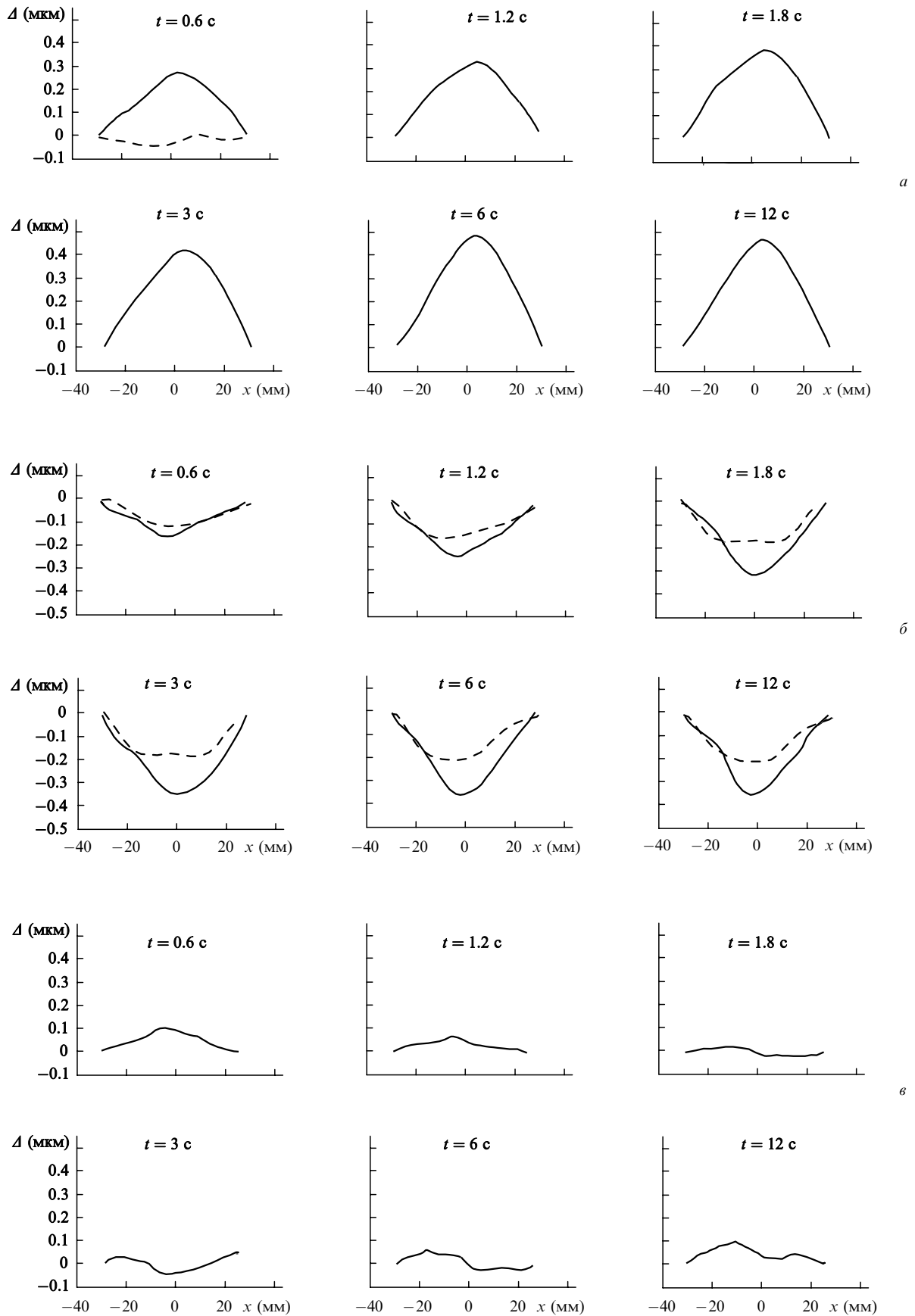


Рис.5. Динамика деформации отражающей поверхности зеркала при воздействии на него лазерного излучения с эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт (а), при электрическом подогреве с мощностью $P_R = 90$ (штриховые кривые) и 180 Вт (сплошные кривые) обратной стороны зеркала (б) и при совместном воздействии на зеркало лазерного излучения с эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт и электрического контрподогрева с $P_R = 180$ Вт (в).

воздухом в расчетах не учитывался. При расчете термдеформаций граничные условия моделировали реализованное в экспериментах точечное крепление зеркала с его обратной стороны в центральной точке зеркала.

Численные исследования показали, что дисбаланс мощностей лучевой нагрузки и компенсирующего абберации контрподогрева зеркала, зафиксированный в экспериментах, связан с действием двух различных механизмов деформации зеркала при его неоднородном нагреве: изгиба зеркала как целого и вспучивания его отражающей поверхности вследствие расширения материала зеркала. И если изгиб определялся главным образом полной мощностью пучка, то вспучивание существенным образом зависело от распределения тепловыделения $Q(x)$ на поверхности зеркала.

Обычно для слаб-лазеров с неустойчивым резонатором распределение мощности пучка оказывается близким к однородному и соответствует примерно прямоугольному профилю моды неустойчивого резонатора. В экспериментах профиль интенсивности излучения вдоль направления $X'X$ полностью определялся поперечной структурой излучения использовавшегося CO_2 -лазера и был близок к параболическому.

На рис.6 приведены расчетные профили изгиба отражающей (кривые 1, 2) и обратной (кривые 3, 4) сторон зеркала в момент времени $t = 3.6$ с после начала действия на зеркало излучения с параболическим ($Q(x) = \text{const}$) и «экспериментальным» параболическим профилями интенсивности при одной и той же тепловой мощности пучка $P_L = 60$ Вт. Кривые 3, 4 характеризуют изгиб зеркала как целого, который практически одинаков для двух рассматриваемых распределений $Q(x)$. Разница между деформациями отражающей и обратной сторон характеризует относительную долю вспучивания отражающей поверхности в общей термдеформации поверхности зеркала. Видно, что переход от равномерного (кривая 2) к параболическому (кривая 1) профилю тепловыделения приводит за счет вспучивания к увеличению стрелы прогиба отражающей поверхности почти в полтора раза.

Из сравнения кривых 1, 2 и 3, 4 следует, что для рассматриваемого зеркала вклад его изгиба даже при равномерной тепловой нагрузке составляет не более 60 % от общей деформации отражающей поверхности. Поскольку при контрподогреве прогиб отражающей поверхности происходит только за счет изгиба зеркала как целого,

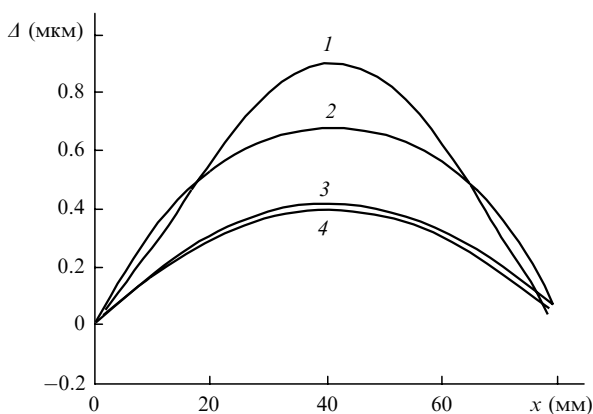


Рис.6. Профиль изгиба отражающей (1, 2) и обратной (3, 4) поверхностей зеркала в момент времени $t = 3.6$ с после начала теплового воздействия при «экспериментальной» (1, 3) и равномерной (2, 4) лучевых нагрузках с эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт.

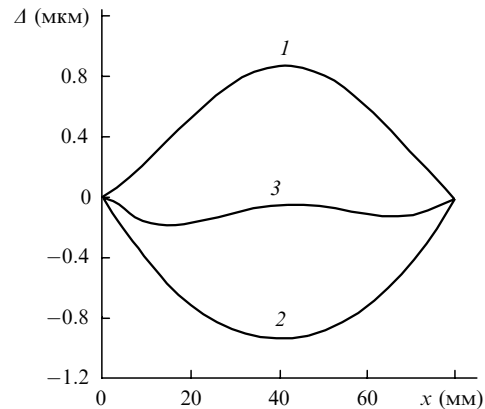


Рис.7. Профиль изгиба отражающей поверхности зеркала в момент времени $t = 3.6$ с после начала теплового воздействия при нагреве лазерным излучением с «экспериментальным» профилем интенсивности и тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт (1), контрподогреве с мощностью $P_R = 180$ Вт (2) и совместном воздействии излучения и электрического подогрева зеркала (3).

компенсация аббераций может быть достигнута лишь при существенном превышении мощности контрподогрева над тепловой мощностью лучевой нагрузки, что и наблюдалось в экспериментах.

На рис.7 приведены расчетные профили изгиба зеркала, соответствующие условиям проведения эксперимента. Кривые 1 и 2 описывают изгиб отражающей поверхности зеркала при отдельном нагреве его пучком с параболическим профилем интенсивности и эквивалентной тепловой мощностью $P_L = 60$ Вт и электрическим нагревателем с мощностью $P_R = 180$ Вт соответственно. Кривая 3 получена при моделировании совместного нагрева зеркала. Так же как и в экспериментах, наблюдается компенсации аббераций отражающей поверхности. Из рис.7 видно, что за счет контрподогрева удается почти на порядок уменьшить амплитуду термоискажений.

На рис.8 приведена динамика стрелы прогиба зеркала Δ_{60} (рассчитанной при апертуре 60 мм, отвечающей области расшифровки интерферограмм) в условиях, соответствующих рис.7. В течение всего временного промежутка (от $t = 0$ до $t = 12$ с) остаточные искажения оказываются почти на порядок меньше, чем термоабберации зеркала, возникающие в отсутствие контрподогрева. Заметим, однако, что абсолютные значения расчетных стрел прогиба зеркала примерно на 15 % – 20 % превышают соответствующие экспериментальные значения. Это различие, по-видимому, может быть объяснено неучтенным в расчетах теплообменом зеркала с воздухом.

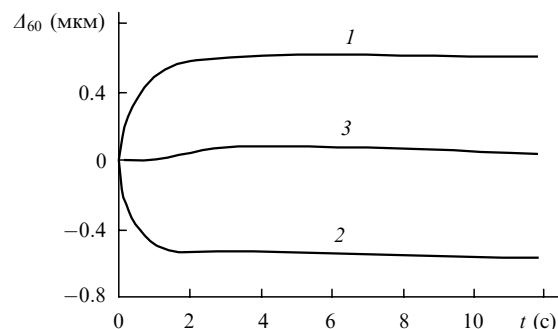


Рис.8. Динамика стрелы прогиба зеркала, полученная для условий, соответствующих рис.7.

Некоторое различие теоретических и экспериментальных данных наблюдается и в динамике изгиба зеркала при электрическом подогреве. Из-за инерционности нагревательного элемента в экспериментах было зафиксировано некоторое запаздывание деформации зеркала при электрическом подогреве по сравнению с его деформацией при нагреве лазерным пучком. В расчетах нагревательный элемент моделировался как безынерционный источник тепла, поэтому динамика прогиба зеркала при нагреве его излучением и электрическим током оказывается практически одинаковой.

Таким образом, предложенная конструкция зеркала с контрподогревом позволяет практически полностью компенсировать термоискажения зеркала. Увеличивая мощность контрподогрева, можно добиться отрицательного прогиба зеркала, что позволит компенсировать термодформации остальных неподогреваемых зеркал резонатора и свести к минимуму абберации выходного пучка лазера. Очевидно, что относительная мощность контрподогрева должна подбираться экспериментально и мо-

жет меняться при эксплуатации зеркала по мере деградации отражательных свойств зеркальных покрытий.

В схемах слэб-лазеров с неустойчивым резонатором профиль пучка близок к прямоугольному, поэтому можно ожидать, что эффект компенсации будет достигаться при меньшем отношении мощностей нагрева зеркала излучением и электрическим током, чем в наших экспериментах.

Авторы выражают свою благодарность А.И.Дутову и Е.А.Зобову за полезные обсуждения на этапах постановки задачи и анализа полученных результатов.

1. Jackson P.E., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1950 (1989).
2. Dutov A.I., Novoselov N.A., Sokolov V.N., Kuleshov A.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2713**, 51 (1996).
3. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
4. Friede D., Hage H., Herzner K., Scholz V. US Patent 5,751,750, filed 10 Feb. 1997, issued 12 May 1998.
5. Харитонов В.В. *Теплофизика лазерных зеркал* (М.: Машиностроение, 1993).