

И.А. Бородина, М.А. Воронцов, В.Я. Панченко

**МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛ
НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ
УПРАВЛЯЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассматривается задача оптимизации оптической схемы телескопического резонатора в условиях тепловых деформаций зеркал. Для коррекции расходимости выходного излучения предлагается использовать внутри резонатора зеркало с заранее рассчитанной асферической формой поверхности. Показано, что при расчете корректирующего профиля можно эффективно использовать относительно простые методы, основанные на приближении геометрической оптики.

Тепловые деформации зеркал резонаторов являются одной из основных причин, препятствующих достижению высоких значений выходной мощности и малой угловой расходимости лазерного излучения [1, 2]. Выбор материалов для изготовления зеркал, совершенствование технологии обработки их поверхностей, использование различных систем охлаждения позволяют уменьшить термодформации. Тем не менее с помощью перечисленных «пассивных» методов полностью устранить их влияние не удается.

С этой точки зрения представляет интерес исследование активных методов внутрирезонаторной коррекции. Один из методов связан с использованием в резонаторе зеркал, имеющих асферическую форму поверхности, рассчитанную с учетом тепловых деформаций, возникающих при заданной мощности лучевой нагрузки. В частности, для коррекции термических искажений может быть использовано зеркало с управляемым профилем поверхности [3]. Асферический профиль поверхности такого зеркала формируется за счет подачи на его приводы предварительно рассчитанных управляющих напряжений.

В настоящей работе обсуждаются методы расчета асферических оптических элементов, предназначенных для коррекции тепловых деформаций зеркал резонатора.

1. Рассмотрим неустойчивый телескопический резонатор, вогнутое зеркало которого является корректирующим (рис. 1, *a*). Ограничимся анализом осесимметричного случая. Фазовый сдвиг, приобретаемый волной при отражении от вогнутого зеркала, представим в следующем виде:

$$\varphi(r) = \varphi_0(r) + \varphi_C(r) + u(r), \quad (1)$$

где $\varphi_0(r)$ — регулярная фаза, соответствующая невозмущенному сферическому профилю зеркала, фазовый профиль $\varphi_C(r)$ учитывает искажения отражающей поверхности вследствие нагрева; $u(r)$ — корректирующая фазовая добавка, которую представим в виде степенного ряда:

$$u(r) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n r^{2n}. \quad (2)$$

Задача компенсации термодформаций заключается в определении абберационных коэффициентов c_n , при которых обеспечивается минимальная расходимость излучения.

Для вычисления абберационных коэффициентов в [2] использовались градиентные методы, хорошо зарекомендовавшие себя при решении линейных задач оптимизации [3]. В рассматриваемом нелинейном случае применение градиентных методов поиска абберационных коэффициентов приводит к необходимости многократного решения самосогласованной задачи распространения поля в резонаторе с учетом термодформаций его зеркал, что сопряжено с значительными вычислительными трудностями.

В связи с этим актуальна задача разработки более простых, полуаналитических методов расчета асферического профиля корректирующего зеркала резонатора.

2. Найдем распределение фазы излучения в выходной плоскости телескопического резонатора (рис. 1, *a*) с коэффициентом увеличения M , зеркала которого деформированы вследствие нагрева. Для этого воспользуемся известным подходом [1], основанным на применении геометрооптического приближения. Основное предположение заключается в следующем. Ход лучей в резонаторе с деформированными зеркалами совпадает с ходом лучей в идеальном резонаторе. Искажения поверхностей

зеркал приводят лишь к изменению оптической длины пути соответствующих лучей (это справедливо для малых деформаций).

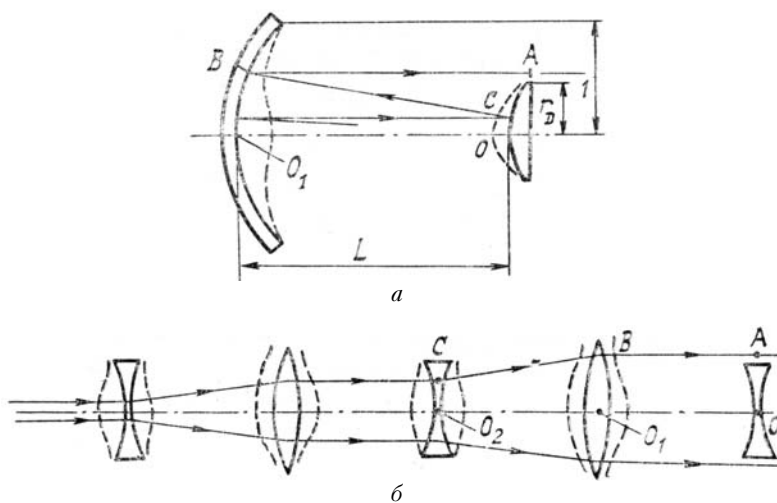


Рис. 1

Из-за наличия тепловых деформаций зеркал оптическая длина пути для различных лучей в резонаторе будет разной. В результате фазовый фронт $\Phi(r)$ в выходной плоскости будет отличаться от плоского, причем это отличие и будет равно разности оптических длин путей для лучей с различными координатами r в выходной плоскости.

На рис. 1, б изображена оптическая линия, эквивалентная телескопическому резонатору. Зеркалам резонатора соответствуют собирающие и рассеивающие линзы, а тепловые деформации зеркал моделируются тонкими фазовыми экранами, расположенными вблизи их поверхностей. Каждая из ячеек эквивалентной схемы соответствует одному полному проходу излучения в резонаторе. Обозначим r_D, r_C — радиусы рассеивающего и собирающего зеркал, $w_D(r), w_C(r)$ — смещения поверхностей зеркал вследствие нагрева. Тепловые деформации представим в виде степенных рядов:

$$\begin{aligned} w_D(r) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^{2n}, \\ w_C(r) &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n r^{2n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Найдем разность хода между произвольным лучом ABC... с координатой r в выходной плоскости и лучом $OO_1O_2...$, проходящим по оси резонатора. Если координата r луча ABC... попадает в пределы рассеивающего зеркала $[0, r_D]$, то разность оптических путей указанных лучей на одном периоде эквивалентной схемы можно записать следующим образом:

$$\Delta L_I(r) = 2(w_D(0) + w_C(0) + u(0)) - w_D(r) - 2w_C(r) - w_D\left(\frac{r}{M}\right). \quad (4)$$

В случае, когда координата r лежит в пределах выходной апертуры $[r_D, 1]$, соответствующая разность хода выразится соотношением

$$\Delta L_{II}(r) = 2(w_D(0) + w_C(0) + u(0)) - w_D\left(\frac{r}{M}\right) - 2w_C(r). \quad (5)$$

Выражения (4), (5) для разности оптических длин лучей, накапливающейся за один полный проход резонатора, с учетом (2), (3) можно представить в виде степенных следующих рядов:

$$\Delta L_I(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^I r^{2n}, \quad (6)$$

где $\beta_n^I = -a_n(1 + 1/M^{2n}) - 2(b_n + c_n)$, и, соответственно,

$$\Delta L_{II}(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n^{II} r^{2n}, \quad (7)$$

где $\beta_0^{II} = a_0$; $\beta_n^{II} = -a_n / M^{2n} - 2(b_n + c_n)$.

После одного полного прохода резонатора координата луча ABC... будет равна r/M . Для вычисления разности хода на следующих участках эквивалентной схемы можно использовать формулы (6), (7), заменив в них координату r на r/M , r/M^2 , r/M^3 и т. д. С учетом того что ни один луч не попадает в пределы выходной апертуры $[r_D, 1]$ дважды, полная разность оптических длин $\Delta(r)$ лучей с разными координатами в выходной плоскости будет вычисляться следующим образом:

$$\Delta(r) = \begin{cases} \Delta L_I(r) + \Delta L_I(r/M) + \Delta L_I(r/M^2) + \dots, & r \in [0, r_D] \\ \Delta L_{II}(r) + \Delta L_I(r/M) + \Delta L_I(r/M^2) + \dots, & r \in [r_D, 1]. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив в это выражение ряды (6), (7), после суммирования соответствующих рядов получим:

$$\Delta(r) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M^{2n}}{M^{2n} - 1} \cdot \beta_n^I \cdot r^{2n}, & r \in [0, r_D] \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M^{2n}}{M^{2n} - 1} \cdot [a_n/M^{2n} + b_n + c_n] r^{2n}, & r \in [r_D, 1]. \end{cases} \quad (9a)$$

$$\Delta(r) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M^{2n}}{M^{2n} - 1} \cdot \beta_n^I \cdot r^{2n}, & r \in [0, r_D] \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M^{2n}}{M^{2n} - 1} \cdot [a_n/M^{2n} + b_n + c_n] r^{2n}, & r \in [r_D, 1]. \end{cases} \quad (9b)$$

Выражение (9) описывает пространственный профиль волнового фронта выходного излучения резонатора, деформированного вследствие нагрева.

В идеальном телескопическом резонаторе $\Delta(r) = \text{const}$. Определим, при каких значениях коэффициентов c_n это равенство выполняется в пределах выходной апертуры $[r_D, 1]$ резонатора с деформированными зеркалами.

Одно из решений можно получить, приравняв нулю коэффициенты степенного ряда (9б). При этом искомые абберрационные коэффициенты c_n связаны с коэффициентами степенных рядов для термодформаций простым соотношением:

$$c_n = -a_n/M^{2n} - b_n. \quad (10)$$

Дальнейшее решение задачи проводится численными методами.

3. Схема численного эксперимента выглядит следующим образом.

На первом этапе решается самосогласованная задача распространения поля в резонаторе с учетом тепловых деформаций его зеркал. Метод решения самосогласованной задачи подробно рассмотрен в [2] и состоит в последовательных вычислениях распределений комплексной амплитуды поля и соответствующих профилей термодформаций зеркал резонатора. Расчет поля на каждом этапе проводится методом установления с использованием итерационной процедуры Фокса — Ли [1].

Для определения термодформаций применяется полуаналитический метод расчета, предложенный в [5]. При этом зеркала представляются в виде плоских круглых пластин. Считается, что их цилиндрические поверхности поддерживаются при постоянной температуре. Метод основан на совместном использовании стационарной несвязанной теории термоупругости твердого тела и теории изгиба тонких пластин. В результате решения самосогласованной задачи находятся распределение стационарного поля в резонаторе с тепловыми деформациями и профили поверхностей деформированных зеркал.

Второй этап численного эксперимента заключается в аппроксимации найденных термодформаций $w_D(r)$ и $w_C(r)$ степенными функциями. При этом используется метод наименьших квадратов. Будем считать, что форма корректирующего асферического зеркала может отличаться от первоначальной сферической наличием двух типов абберраций, соответствующих дефокусировке ($S_1(r) = \sqrt{3} \cdot (2r^2 - 1)$) и сферической абберрации ($S_2(r) = \sqrt{5} \cdot (6r^4 - 6r^2 + 1)$). Тогда в представлениях (2), (3) для корректирующей добавки и тепловых деформаций можно ограничиться учетом лишь трех членов: $n = 0, 1, 2$.

На третьем этапе по формуле (10) определяются коэффициенты степенного ряда (2), обеспечивающие в пределах выходной апертуры выполнение условия постоянства фазы выходного излучения ($\Delta(r) = \text{const}$). Рассчитывается соответствующий профиль корректирующего зеркала.

Заключительный этап численного эксперимента состоит в решении самосогласованной задачи распространения поля в резонаторе, вогнутое зеркало которого имеет форму, рассчитанную для компенсации искажений волнового фронта, вносимых термодформациями зеркал.

4. Задача оптимизации расходимости выходного излучения решалась для телескопического резонатора с увеличением $M = 2,5$ и эквивалентным числом Френеля $N_e = 5,5$. Радиус и толщина выходного зеркала: $r_0^D = 1,25$ см и $z_0^D = 0,5$ см. Вогнутое асферическое зеркало имело размеры $r_0^C = 5$ см и $z_0^C = 0,5$ см. Материал зеркал — медь, коэффициенты отражения 98,5%.

В результате проведенных исследований обнаружено, что использование в резонаторе асферического зеркала, форма которого рассчитана с учетом коэффициентов аппроксимации точных распределений $w_D(r)$ и $w_C(r)$, полученных из решения самосогласованной задачи, позволяет практически полностью устранить влияние термодформаций на пространственную структуру выходного излучения.

На рис. 2 приведены распределения фазы излучения в выходной плоскости резонатора. Наличие тепловых деформаций зеркал резонатора приводит к значительным искажениям волнового фронта выходного излучения. Это подтверждается результатами численного анализа (кривая 2). Распределение фазы для резонатора с корректирующим зеркалом практически совпадает с соответствующим распределением для недеформированного резонатора (кривая 1).

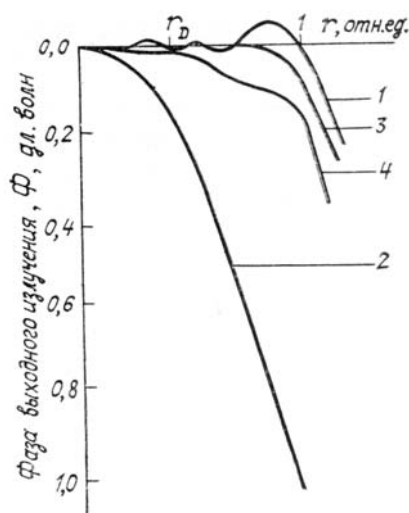


Рис. 2

Для оценки расходимости выходного излучения будем использовать фактор Штреля St (отношение интенсивности в фокусе линзы, расположенной на выходе деформированного резонатора, к соответствующему значению для невозмущенного резонатора). В рассматриваемом случае для резонатора с тепловыми деформациями в отсутствие компенсации St равно 0,065, а при ее наличии — 1,02.

Для определения формы асферического зеркала использовались распределения тепловых деформаций зеркал, полученные в результате решения самосогласованной задачи. На практике рассчитать или измерить термодформации достаточно сложно. В связи с этим подход к расчету формы корректора можно несколько изменить, ориентируясь на практически доступные данные. Рассмотрим два варианта.

В первом случае используется лишь одно распределение интенсивности в плоскости перед выходным зеркалом. Далее с учетом геометрии резонатора оценивается распределение интенсивности в плоскости перед собирающим зеркалом резонатора и рассчитываются тепловые деформации зеркал, которые, вообще говоря, отличаются от $w_D(r)$ и $w_C(r)$, получаемых в рамках решения самосогласованной задачи. Далее все расчеты проводятся по приведенной выше схеме. Кривая 3 (рис. 2) характеризует распределение фазы, соответствующее резонатору, форма асферического зеркала которого выбиралась по описанной методике. Фактор Штреля при этом равен 0,98.

Во втором случае оценивается лишь среднее значение интенсивности в пределах выходной апертуры. Считается, что рассеивающее зеркало освещено равномерно с этой интенсивностью. Находится соответствующее значение интенсивности в плоскости корректирующего зеркала, и рассчитываются распределения термодформаций зеркал. Несмотря на значительные упрощения в вычислении профиля асферического зеркала, удается увеличить фактор Штреля выходного излучения до $St = 0,93$. Распределение фазы в выходной плоскости показано на рис. 2 (кривая 4).

На рис. 3 приведены зависимости фактора Штреля St от величины суммарного максимального прогиба зеркал $w_\Sigma(o) = w_D(o) + w_C(o)$, вызванного деформацией. Величина w_Σ характеризует интенсивность лучевой нагрузки, которая может быть рассчитана по заданному значению выходной мощности излучения. Кривая 1 рис. 3 соответствует обычному резонатору с деформированными вследствие нагрева зеркалами. Кривые 2, 3, 4 иллюстрируют результаты оптимизации формы вогнутого зеркала соответственно для трех рассмотренных выше способов расчета корректирующего профиля. Пунктиром показана зависимость $St(w_\Sigma)$, полученная с применением градиентных методов оптимизации.

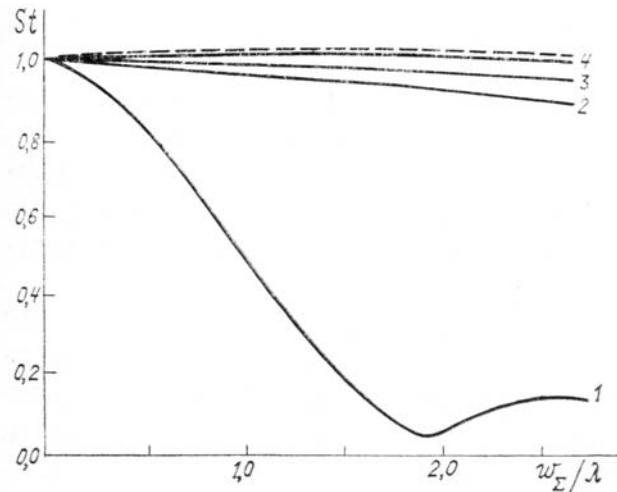


Рис. 3

Для сравнения эффективности различных методов расчета корректирующих зеркал некоторые результаты приведены в таблице.

Величина максимальных прогибов зеркал w_{Σ}	$0,4 \lambda$	$1,82 \lambda$	$2,4 \lambda$
Метод расчета профиля корректирующего зеркала	Фактор Штреля St		
Телескопический резонатор со сферическими зеркалами	0,875	0,065	0,118
Градиентные методы	1,01	1,03	1,03
Аппроксимация деформаций, найденных из решения самосогласованной задачи	1,004	1,02	1,01
Расчет термдеформаций по распределению интенсивности перед выходным зеркалом	0,996	0,97	0,96
Равномерное освещение выходного зеркала средней по выходной апертуре интенсивностью	0,994	0,93	0,91

Приведенные зависимости получены без учета насыщения коэффициента усиления активной среды. Как было проверено с помощью численного эксперимента, учет этих эффектов не приводит к существенному изменению результатов.

Таким образом, в ходе проведенного исследования выявлено, что применение асферического зеркала внутри резонатора позволяет практически полностью устранить влияние термдеформаций на пространственную структуру и расходимость выходного излучения. Показано, что при расчете корректирующего профиля можно эффективно использовать относительно простые методы, основанные на приближении геометрической оптики.

1. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
2. Бородина И. А., Воронцов М. А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 79–85.
3. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1986. 336 с.
4. Воронцов М. А., Матвеев А. Н., Сивоконь В. П. // Известия вузов. Физика. 1985. № 11. С. 78–85.
5. Бородина И. А., Воронцов М. А., Голубев В. С. и др. Расчет тепловых деформаций зеркал резонатора и их влияние на пространственную структуру выходного излучения. Троицк, 1987. 32 с. (Препринт /НИЦТЛ АН СССР, № 19).

I. A. Borodina, M. A. Vorontsov, V. J. Panchenko. The Methods of Compensation of Unstable Resonator Mirrors Thermal Distortions with the Help of Controlled Optical Elements.

The problem of telescope-type resonator optical scheme optimization under the conditions of mirrors thermal deformations is considered. To correct thermal distortions the use of mirrors with calculated aspherical profiles within the laser resonator is proposed. It has been shown, that for the calculation of mirrors corrective profile the methods based on the geometric optics approach are quite efficient.