

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-24-34

УДК 621.373.8

Оценка влияния искажений формы зеркал на оптическое качество излучения в неустойчивых резонаторах

СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ СТРАХОВ¹✉, АНДРЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ САВИН²,
НАТАЛЬЯ ВИКТОРОВНА СОТНИКОВА³

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

¹strakhov_siu@voenmeh.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1713-522X>

²savin_av@voenmeh.ru

<https://orcid.org/0009-0000-7931-2901>

³sotnikova_nv@voenmeh.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6380-9278>

Аннотация

Предмет исследования. Неустойчивый телескопический оптический резонатор. **Цель работы.** Количественная оценка мелкомасштабных неоднородностей зеркал, особенно в неустойчивых резонаторах, и их влияние на параметр M^2 , число Штреля, угол расходимости излучения. **Метод.** Численное моделирование структуры мелкомасштабной неоднородности зеркал, как однородного нормального случайного поля, заданного экспоненциально-косинусной корреляционной функцией, с дальнейшим моделированием неустойчивого резонатора в геометрическом приближении с использованием в качестве «фазовых экранов» зеркал и последующим определением характеристик оптического качества излучения по его диаграмме направленности. Также предложен метод аналитического расчёта показателей оптического качества излучения после неустойчивого резонатора с внутрирезонаторными фазовыми неоднородностями. **Результаты.** В работе рассмотрено влияние искажений формы зеркал на оптическое качество излучения в неустойчивых резонаторах. Представлены результаты исследований влияния уровня и характерного вида искажений на параметр M^2 , число Штреля, угол расходимости излучения. Показан характер зависимости указанных показателей оптического качества от коэффициента увеличения резонатора, радиуса корреляции и среднеквадратического отклонения формы поверхности зеркал. Предложены расчётные соотношения для оценки верхней и нижней границ диапазона изменений показателей оптического качества в зависимости от параметров резонатора и конкретного вида искажений зеркала. **Практическая значимость.** Результаты численного моделирования неустойчивого резонатора сравниваются с количественными оценками, выполненными на основании предложенных расчётных (аналитических) соотношений. На основании анализа результатов формулируются практические рекомендации и выводы, позволяющие корректно учесть влияние искажений формы зеркал на оптическое качество излучения при проектировании резонатора.

Ключевые слова: неустойчивый резонатор, параметр M^2 , число Штреля, угол расходимости излучения, искажение формы зеркала

Ссылка для цитирования: Страхов С.Ю., Савин А.В., Сотникова Н.В. Оценка влияния искажений формы зеркал на оптическое качество излучения в неустойчивых резонаторах // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 24–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-24-34>

Код OCIS: 140.4780.

Evaluation of the effect of mirror shape distortions on the optical quality of radiation in unstable resonators

SERGEY YU. STRAKHOV¹✉, ANDREY V. SAVIN², NATALIA V. SOTNIKOVA³

Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

¹strakhov_siu@voenmeh.ru <https://orcid.org/0000-0003-1713-522X>

²savin_av@voenmeh.ru <https://orcid.org/0009-0000-7931-2901>

³sotnikova_nv@voenmeh.ru <https://orcid.org/0000-0001-6380-9278>

Abstract

Subject of study. An unstable telescopic optical resonator. **Aim of study.** A quantification of small-scale mirror inhomogeneities, especially in unstable resonators, and their effect on M^2 parameter, Strehl number and radiation divergence angle. **Method.** A numerical modeling of the structure of small-scale inhomogeneity of mirrors as a homogeneous normal random field given by an exponential-cosine correlation function, with further modeling of unstable resonator in a geometric approximation using mirrors as "phase screens" and subsequent determination of the characteristics of the radiation optical quality from its radiation pattern. A method of analytical calculation of the radiation optical quality after the unstable resonator with intracavity phase inhomogeneities is also proposed. **Main results.** The paper considers the effect of mirror shape distortions on the optical quality of radiation in unstable resonators. The influence of the level and the characteristic type of distortion on M^2 parameter, Strehl number, radiation divergence angle is investigated. The nature of the dependence of these optical quality indicators on the resonator magnification coefficient, the correlation radius and the standard deviation of the mirror surface shape is shown. The calculated ratios for estimation of the upper and lower limits of the range of changes in optical quality indicators depending on the parameters of the resonator and the specific type of mirror distortion are proposed. **Practical significance.** The results of numerical simulation of the unstable resonator are compared to the quantitative estimates made on the basis of the proposed calculation ratios. Based on the analysis of the results, practical recommendations and conclusions are formulated allowing to correctly take into account the influence of mirror shape distortions on the optical quality of radiation when designing the resonator.

Keywords: unstable resonator, M^2 parameter, Strehl number, radiation divergence angle, mirror shape distortion

For citation: Strakhov S.Yu., Savin A.V., Sotnikova N.V. Evaluation of the effect of mirror shape distortions on the optical quality of radiation in unstable resonators [In Russian] // *Opticheskiy Zhurnal*. 2023. V. 90. № 12. P. 24–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-24-34>

OCIS code: 140.4780.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, внутрирезонаторные неоднородности оказывают сильное влияние на параметры лазерного излучения, особенно, на те показатели, которые определяют его «оптическое качество» — угол расходимости, параметр M^2 , число Штреля. На сегодняшний день известен ряд работ, направленных на исследование, как самих внутрирезонаторных неоднородностей, так и их влияния на мощность и расходимость излучения. Одной из наиболее полных работ, посвящённых этому вопросу, является монография Ю.А. Аналиева [1], где не только представлены резуль-

таты различных исследований по указанному вопросу, но и предложен метод «абберационных коэффициентов» для оценки влияния оптических неоднородностей активной среды на выходные параметры излучения. В более поздних исследованиях рассматривались неоднородности активной среды (фазовые и амплитудные) мощных газовых [2–4] и твердотельных лазеров [5–7], в которых уровни оптических аббераций могут достигать критических значений с точки зрения оптического качества излучения, что требует использования специальных конструкций резонаторов и средств компенсации самих искажений [8, 6].

В работах [3, 4] рассмотрены вопросы формирования мелкомасштабных неоднородностей активной среды и их влияние на параметры излучения в режиме однократного усилителя и в режиме неустойчивого резонатора. В работе [9] рассмотрено влияние на мощность и расходимость излучения крупномасштабных «эксплуатационных» искажений, вносимых зеркалами резонатора, типа «оптического клина», вызванного разъюстировкой резонатора, и «линзы», связанной с термодформацией зеркала в процессе работы лазера.

Однако, несмотря на большое количество работ на эту тему, остаётся открытым вопрос, связанный с влиянием мелкомасштабных (имеющих характерный размер, меньший апертуры лазерного пучка) неоднородностей зеркал резонатора на параметры излучения. Такие неоднородности носят «технологический» характер и, в первую очередь, связаны с особенностями процесса изготовления зеркал. Мелкомасштабные неоднородности зеркал, особенно в неустойчивых резонаторах, могут приводить к критическому ухудшению оптического качества излучения. В этой связи актуальным является вопрос адекватной количественной оценки их влияния, которая позволила бы при известных требованиях к оптическому качеству (углу расходимости или параметру M^2) определить допустимые отклонения поверхности зеркала от номинальных значений и сформулировать обоснованные требования технологу — изготовителю зеркал. Именно этому вопросу посвящена данная работа.

Цель работы — количественная оценка мелкомасштабных неоднородностей зеркал, особенно в неустойчивых резонаторах и их влияние на параметр M^2 , число Штреля, угол расходимости излучения.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим неустойчивый телескопический оптический резонатор (рис. 1). Как известно, формирование моды в таком резонаторе осуществляется в узкой приосевой области, поперечный размер которой можно считать равным диаметру зоны Френеля

$$d_0 \approx 2\sqrt{\lambda L}, \quad (1)$$

где L — длина резонатора, λ — длина волны излучения.

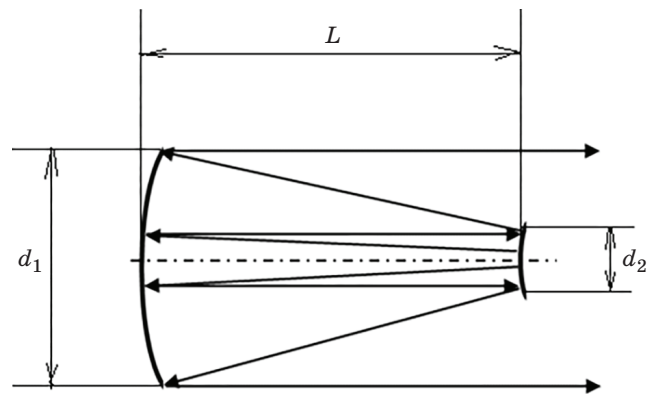


Рис. 1. Принципиальная схема оптического резонатора

Fig. 1. Schematic diagram of an optical resonator

За счёт отражения от зеркал и действия дифракции приосевой пучок диаметром $d \leq d_0$ за определённое число проходов по резонатору увеличивает свой поперечный размер до диаметра $d_2 < d < d_1$ и выходит из резонатора. Для простоты расчётов пренебрежём действием дифракции, что допустимо при больших числах Френеля резонатора, и также будем считать, что на выходе из резонатора $d \approx d_1$, что вполне допустимо, так как и первоначальный поперечный размер пучка определяется по соотношению (1) приближенно. Зная коэффициент увеличения резонатора m и поперечный размер зеркала d_1 , можно оценить число полных проходов N через резонатор (каждый полный проход — это два отражения от зеркал и два прохода через активную среду), после которого пучок его покинет, используя соотношение

$$m^N d_0 = d_1, \quad (2)$$

откуда

$$N = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) / \ln m. \quad (3)$$

Обозначим среднеквадратичное отклонение (СКО) формы зеркала ΔL_0 . Тогда при однократном отражении от зеркала волновой фронт (ВФ) излучения приобретает искажение, СКО которого можно определить по формуле:

$$\Delta \phi_{rms1} = 2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L_0\right). \quad (4)$$

В первом приближении, с учётом предположения о независимости накопления фазовых

искажений после отдельных отражений от зеркал, суммарное среднеквадратичное отклонение фазы за всё время существования излучения в резонаторе, т.е. после $2N$ отражений от зеркал, можно оценить по выражению

$$\overline{\Delta\varphi_{\text{rms}}} = \overline{\Delta\varphi_{\text{rms1}}} \sqrt{2N}. \quad (5)$$

Формула (5) даёт очень грубую и завышенную оценку СКО, так как при её выводе предполагается, что при каждом отражении вносимое отклонение фазы является независимой случайной величиной. В действительности искажение формы зеркал имеет конечный радиус корреляции, поэтому соседние отражения могут создавать не вполне независимые искажения волнового фронта. В формуле (5) неявно предполагается, что радиус корреляции искажений формы зеркал равен нулю. Кроме того, в процессе распространения в резонаторе пучок постоянно меняет свой размер от d_0 до d_1 , а указанная формула справедлива лишь в случае, когда пучок не меняет своего поперечного размера и накопление аберраций от прохода к проходу происходит по всей его площади. В реальной ситуации СКО будет находиться в широком диапазоне

$$\overline{\Delta\varphi_{\text{rms1}}} < \overline{\Delta\varphi_{\text{rms}}} < \overline{\Delta\varphi_{\text{rms1}}} \sqrt{2N}, \quad (6)$$

Введём функцию $\alpha(m)$, аналогичную аберрационным коэффициентам Ю.А. Ананьева [1] и показывающую, во сколько раз искажения ВФ, приобретённые после однократного отражения от зеркала резонатора, возрастают после прохождения излучением неустойчивого резонатора. Функция $\alpha(m)$ зависит как от коэффициента увеличения, так и от конкретного вида искажений отражающей поверхности зеркал. Исходя из определения, функция $\alpha(m)$ лежит в диапазоне

$$1 < \alpha(m) < \sqrt{2N}. \quad (7)$$

Определить универсальную аналитическую зависимость для $\alpha(m)$ затруднительно. Можно подобрать её значения только эмпирически, сравнивая результаты численного моделирования и расчётные зависимости, или использовать разложение фазового искажения в степенной ряд [1], что тоже не всегда просто.

Дисперсия фазы ВФ может быть определена по соотношению:

$$D_\varphi = \frac{1}{S} \iint_S (\varphi(x, y) - \bar{\varphi})^2 dS = \overline{\Delta\varphi_{\text{rms}}}^2, \quad (8)$$

где $\varphi(x, y)$ — значение фазы в точке на апертуре площадью S , $\bar{\varphi}$ — среднее значение фазы на апертуре площадью S .

Существует эмпирическая зависимость, указывающая, что дисперсия фазы связана с числом Штреля следующим соотношением (аппроксимацией), справедливым при числе Штреля, близком к единице

$$Sh = \exp(-D_\varphi). \quad (9)$$

В то же время, известна связь числа Штреля, параметра M^2 и угловой расходимости излучения θ

$$M^2 = \theta/\theta_0 = 1/\sqrt{Sh}, \quad (10)$$

где θ — фактический угол расходимости излучения с учётом «неидеального» ВФ на выходе из резонатора, а θ_0 — дифракционный угол расходимости излучения, определяемый для плоского волнового фронта в апертуре лазера.

В частности, для конфокального неустойчивого резонатора с кольцевой апертурой круглой формы величина дифракционного угла расходимости равна

$$\theta_0 = \frac{2,44\lambda}{d_1} \frac{m}{m-1}. \quad (11)$$

Тогда, с учётом выражений (8)–(10), можно записать:

$$M^2 = \theta/\theta_0 = \exp\left(\frac{1}{2} D_\varphi\right). \quad (12)$$

Если воспользоваться соотношениями (1)–(12), то зная СКО формы зеркала, можно оценить основные показатели качества излучения: число Штреля, угол расходимости излучения, параметр M^2 . И наоборот: зная требования, предъявляемые к оптическому качеству излучения, можно сформулировать соответствующие требования к качеству поверхности зеркал резонатора.

Можно записать обобщённые соотношения, вытекающие из (1)–(12) и связывающие показатели качества излучения с отклонениями формы поверхности зеркала резонатора $\overline{\Delta L_0}$. Эти соотношения позволяют определить наилучшую и наилучшую оценку показателей оптического качества излучения с учётом вариативности абберационного коэффициента $\alpha(m)$ (7):

А) наихудшая оценка оптического качества

$$M^2 = \theta/\theta_0 = 1/\sqrt{Sh} = \exp\left\{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\overline{\Delta L_0}\right)^2 \log_m\left(\frac{d_1}{2\sqrt{\lambda L}}\right)\right\}. \quad (13)$$

Б) наилучшая оценка оптического качества

$$M^2 = \theta/\theta_0 = 1/\sqrt{Sh} = \exp\left\{\left(\frac{\pi}{\lambda}\overline{\Delta L_0}\right)^2\right\}. \quad (14)$$

Обратим внимание на особенности формул (13) и (14):

- определяют лишь диапазоны значений параметров оптического качества (крайние значения, соответствующие наилучшей и наихудшей оценке);
- не учитывают конкретный вид искажений формы зеркала, в частности, пространственный масштаб искажений, что очень важно для получения точных результатов [3, 4];
- наиболее точные оценки соответствуют диапазону значений $M^2 = 1-2$. При больших значениях M^2 погрешность расчётов будет сильно возрастать.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО РЕЗОНАТОРА

Оценим влияние искажений отражающей поверхности зеркал с помощью численного моделирования. Относительно точное моделирование неустойчивого резонатора можно осуществить с помощью численного решения параболического волнового уравнения и использования метода «фазовых экранов» для учёта неоднородностей среды распространения излучения, как это делалось, например, в [8]. Однако, как известно, влияние дифрак-

ции начинает сильно сказываться при числах Френеля резонатора менее 10. В то же время, для лазеров ближнего ИК диапазона числа Френеля неустойчивых резонаторов составляют несколько десятков или даже сотен единиц. Поэтому для упрощения расчётов неустойчивый телескопический резонатор «положительной ветви» (рис. 1) моделировался в геометрическом приближении без учёта дифракции.

Моделирование выполнялось по технологии «фазовых экранов». Вначале задавалось равномерное распределение фазы в поперечном направлении лазерного пучка. Первичный диаметр пучка составлял величину d_0 (1). Далее определялось примерное число полных проходов через резонатор (3) до того, как пучок покинет резонатор через выходное зеркало.

Затем пучок последовательно «распространялся» между зеркалами, увеличиваясь в поперечном размере на величину m на каждом полном проходе, а при «отражении» от зеркал к двумерному распределению фазы ВФ добавлялась двумерная функция, определяющая фазовые искажения за счёт отклонений от формы поверхности зеркала.

Зеркало в рамках данной задачи моделировалось в виде случайного поля фаз. Исходным материалом при моделировании случайных полей являются независимые случайные числа. Совокупность таких чисел рассматривается как δ -коррелированное случайное поле или просто δ -поле. δ -поле является обобщением дискретного белого шума на случай нескольких переменных. Моделирование такого поля осуществляется так: пространственно-временной координате ставится в соответствие выбранное значение числа из датчика нормальных случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Стационарное однородное скалярное нормальное случайное поле полностью задаётся своей пространственно-временной корреляционной функцией. В рамках данной задачи было принято решение, что наиболее точно распределение фазы зеркала отражает экспоненциально-косинусная корреляционная функция [10].

Общий принцип моделирования случайного поля содержит три следующих этапа:

1. Формируется δ -поле нужной размерности и заполняется независимыми отсчётами с нормальным законом распределения.

2. С помощью алгоритмов моделирования случайных процессов (в данном случае с экспоненциальной корреляционной функцией) производим фильтрацию вдоль оси x .

3. Производим аналогичную процедуру фильтрации вдоль оси y . Моделирование может проводиться методом рекуррентных уравнений или методом скользящего суммирования.

Основными количественными параметрами, определяющими при моделировании фазовых искажений, вносимые зеркалом, являются СКО формы зеркала и коэффициент корреляции ρ соседних точек случайного процесса, описывающего геометрию отражающей поверхности зеркала [10]. С точки зрения практического применения более удобным видится понятие «радиуса корреляции» r_0 — минимального расстояния между «некоррелированными» точками зеркала. По сути радиус корреляции равен размеру области локальной деформации поверхности зеркала (и, соответственно, ВФ), и, если бы речь шла о регулярных деформациях, описываемых периодической функцией, то радиус корреляции был бы равен периоду. В таблице представлена связь коэффициента корреляции с абсолютным и относительным радиусом корреляции для случая, когда величина $d_1 = 0,2$ м.

Влияние возможных неоднородностей амплитуды по апертуре лазерного пучка на оптическое качество излучения, как известно, существенно ниже, чем влияние искажений фазы, поэтому им можно пренебречь. В расчётах амплитуда в поперечном сечении пучка считалась равномерной и равной 1 в области, «занятой» излучением и равной 0 в области, где излучение отсутствует. На выходе из резонатора в поперечном сечении пучка выделя-

лась кольцевая апертура: внутри её амплитуда равнялась 1, вне — нулю.

Для определения показателей оптического качества излучения — угла расходимости, параметра M^2 , числа Штреля — осуществлялось преобразование Фурье комплексной амплитуды поля после резонатора и моделировалась диаграмма направленности излучения (дальняя зона дифракции), по которой уже и определялись указанные показатели.

Основными параметрами резонатора, являющимися входными данными для моделирования, являлись:

- коэффициент увеличения резонатора m ,
- длина волны излучения λ ,
- длина резонатора L ,
- диаметры зеркал резонатора d_1, d_2 ,
- СКО формы зеркала ΔL_0 ,
- коэффициент корреляции ρ или связанный с ним радиус корреляции r_0 (таблица).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО РЕЗОНАТОРА ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ

Рассмотрим некоторые результаты моделирования неустойчивого резонатора при наличии искажений отражающей поверхности зеркал при следующих условиях:

- коэффициент увеличения резонатора m варьируется в диапазоне 1,3–2,0;
- длина волны излучения $\lambda = 1$ мкм;
- длина резонатора $L = 1,5$ м;
- диаметры зеркал резонатора $d_1 = 0,2$ м, $d_2 = d_1/m$;
- относительный СКО формы зеркала $\Delta L_0/\lambda$ варьируется в диапазоне 0–1;
- относительный радиус корреляции r_0/d_1 варьируется в диапазоне 0,01–0,2.

На рис. 2 в качестве примера показана структура ВФ после однократного отражения от зеркала и на выходе излучения после резонатора, а также структура диаграммы направленности излучения (для полностью заполненной апертуры в форме круга). На рисунке чётко видны области локальной деформации ВФ, средний размер которых соответствует радиусу корреляции.

На рис. 3 представлена зависимость среднеквадратического отклонения волнового фронта излучения на выходе из резонатора от относи-

Связь коэффициента и радиуса корреляции
Correlation coefficient and radius relation

Коэффициент корреляции ρ	Радиус корреляции r_0 , м	Отношение r_0/d_1
0,1	0,000169	0,000845
0,5	0,00056	0,0028
0,7	0,001	0,005
0,9	0,0037	0,0185
0,99	0,039	0,195
0,995	0,078	0,39

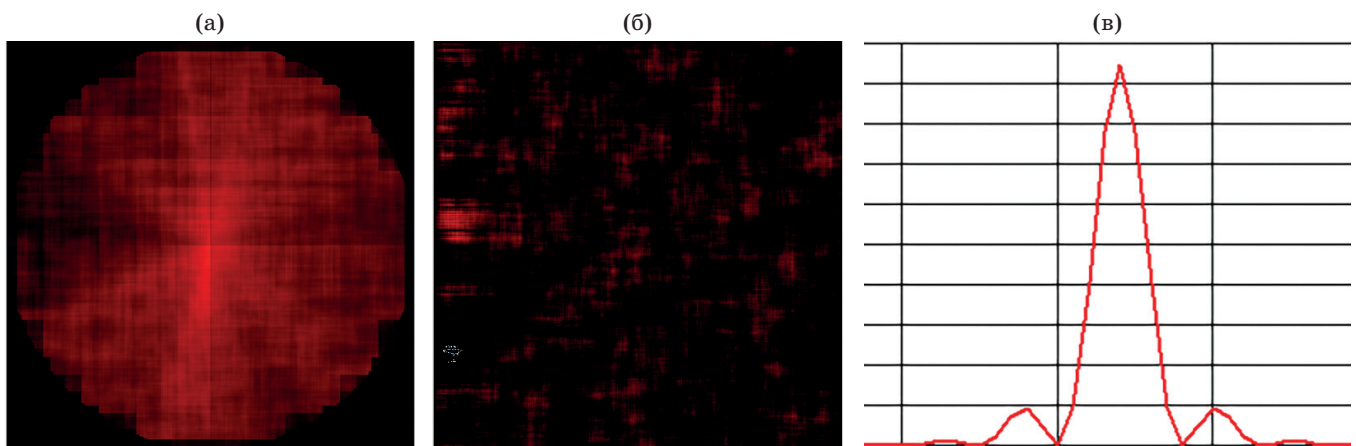


Рис. 2. Структура ВФ после однократного отражения от зеркала (а), структура ВФ на выходе из резонатора (б), структура диаграммы направленности излучения (в)

Fig. 2. The structure of the wavefront after a single reflection from the mirror (a), the structure of the wavefront at the output of the resonator (b), the structure of the radiation pattern (v)

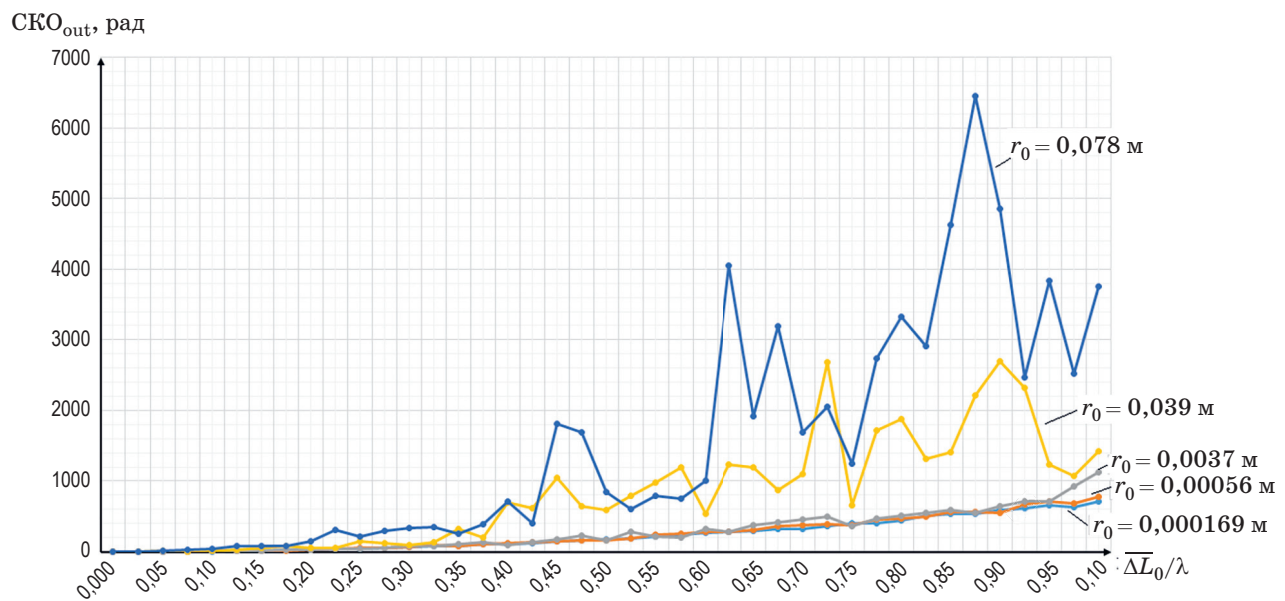


Рис. 3. Зависимость СКО фазы излучения на выходе из резонатора от относительной СКО формы зеркала $\Delta L_0/\lambda$ при различных значениях радиуса корреляции

Fig. 3. Dependence of the standard deviation of the radiation phase at the output of the resonator on the relative standard deviation of the mirror shape $\Delta L_0/\lambda$ at different values of the correlation radius

тельного СКО формы зеркала $\Delta L_0/\lambda$ при различных значениях радиуса корреляции. Из рисунка видно, что СКО фазы после резонатора предсказуемо возрастает с ростом СКО формы зеркала. Причём, с увеличением радиуса корреляции значения СКО увеличиваются. Это, очевидно, связано с тем, что при малых радиусах корреляции имеет место определённая

геометрическая «самокомпенсация» искажений, которая, несмотря на случайный характер искажений, всё-таки обеспечивает определённое снижение уровня СКО после резонатора [3, 4].

На рис. 4 представлена зависимость СКО фазы на выходе из резонатора от его коэффициента увеличения при различных значениях

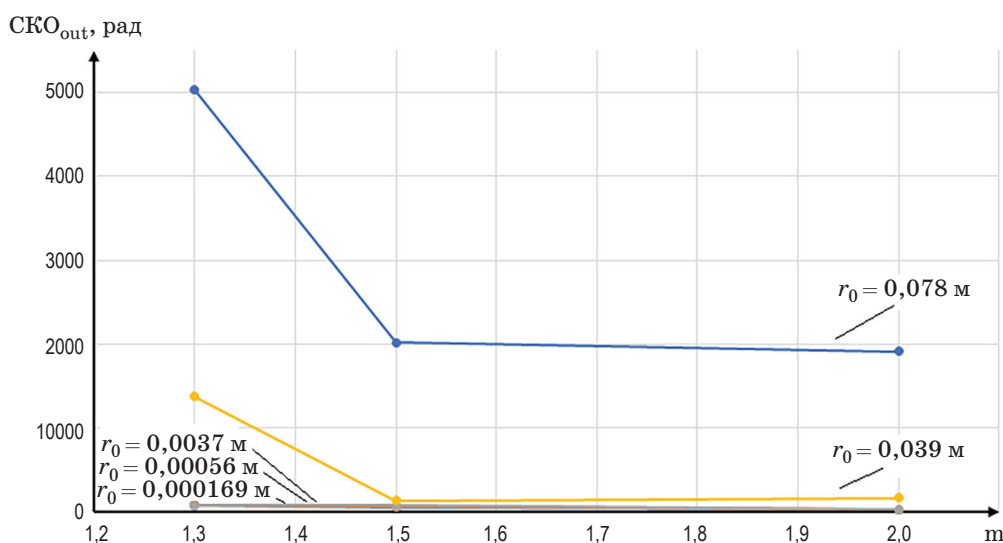


Рис. 4. Зависимость СКО фазы на выходе из резонатора от его коэффициента увеличения при различных значениях радиуса корреляции

Fig. 4. Dependence of the standard deviation of the phase at the output of the resonator on its magnification coefficient at different values of the correlation radius

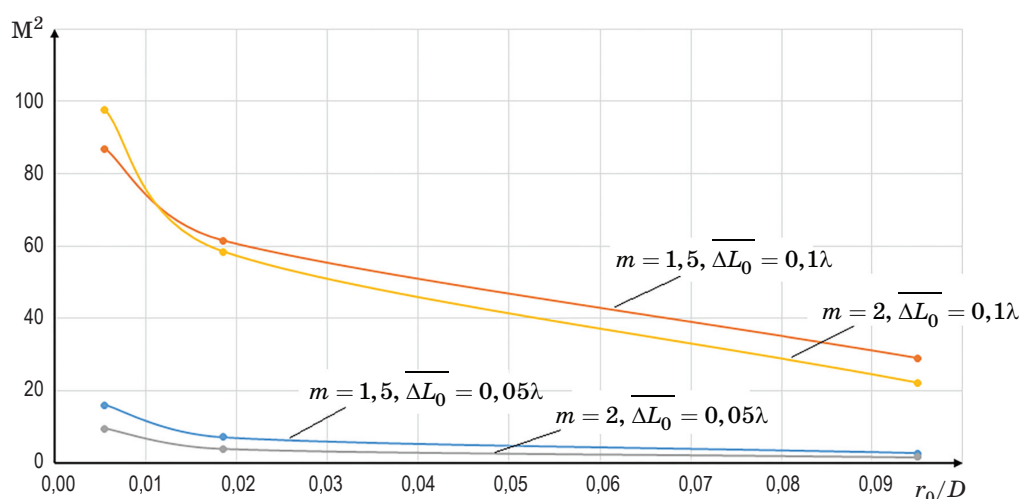


Рис. 5. Зависимости параметра оптического качества M^2 от коэффициента увеличения резонатора при различных значениях относительного радиуса корреляции r_0/d_1

Fig. 5. Dependences of the optical quality parameter M^2 on the resonator magnification coefficient at different values of the relative correlation radius r_0/d_1

радиуса корреляции. Результаты расчётов также достаточно предсказуемы: как показано в [1] с ростом коэффициента увеличения резонатора его чувствительность к аберрациям снижается. Это обусловлено меньшим числом проходов излучения в активной среде и количеством отражений от зеркал (см. соотношение (3)). При этом с ростом радиуса корреляции уровень СКО также увеличивается, что соотносится с результатами рис. 3.

На рис. 5 представлены зависимости параметра оптического качества M^2 от коэффициента увеличения резонатора при различных значениях относительного радиуса корреляции r_0/d_1 . Из графиков следует несколько важных моментов:

- С ростом коэффициента увеличения m чувствительность резонатора к неоднородностям зеркал снижается, причём, как видно из рисунка, достаточно резко. Коэффициент

увеличения, меньший 1,5, является нерациональным выбором, так как при низких m происходит резкий рост влияния случайных искажений формы зеркала на оптическое качество излучения. В то же время, стремиться к коэффициенту увеличения резонатора, большему 2, также нецелесообразно, так как эффект снижения чувствительности резонатора к абберациям становится менее выраженным, а энергетическая эффективность резонатора может падать.

• При малых радиусах корреляции, несмотря на то, что в этом случае обеспечивается определённая «самокомпенсация» неоднородностей и снижение СКО на выходе из резонатора, всё равно наблюдается резкое ухудшение оптического качества излучения по критерию M^2 (а, следовательно, и по углу расходимости и по числу Штреля). Это связано с особым характером влияния мелкомасштабных неоднородностей ВФ на параметры излучения в дальней зоне. В работах [3, 4, 11] указанный эффект был описан применительно к стохастическим неоднородностям активной среды резонатора.

На рис. 6 показана зависимость параметра M^2 от относительного СКО формы зеркала при различных значениях относительного радиуса корреляции r_0/d_1 и коэффициентах увеличения резонатора. Зависимости построены

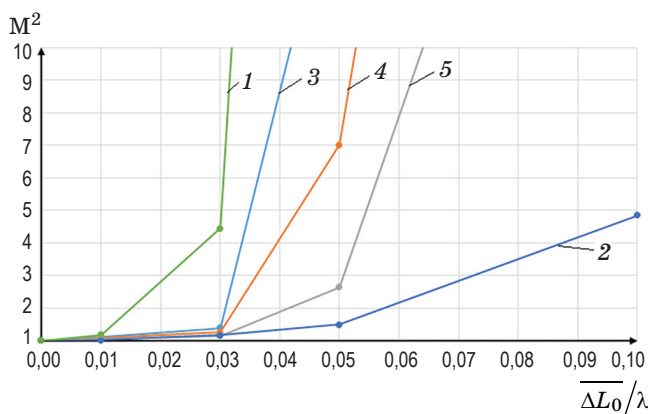


Рис. 6. Зависимость параметра M^2 от относительного СКО формы зеркала. 1 — зависимость (13), 2 — зависимость (14), 3 — $r_0 = 0,001$ м, 4 — $r_0 = 0,0037$ м, 5 — $r_0 = 0,039$ м

Fig. 6. Dependence of M^2 parameter on the relative standard deviation of the mirror shape. 1 — dependence (13), 2 — dependence (14), 3 — $r_0 = 0,001$ m, 4 — $r_0 = 0,0037$ m, 5 — $r_0 = 0,039$ m

для относительно малых СКО, обеспечивающих уровень оптического качества на выходе из резонатора не хуже $M^2 = 10$.

На том же графике представлены кривые, построенные по соотношениям (13), (14) и определяющие верхнюю и нижнюю оценку оптического качества излучения. Как видно из графиков, указанные соотношения точно определяют диапазон значений M^2 , внутри которого будут находиться реальные (расчётные) значения при различных видах и уровнях искажений зеркала. Как и говорилось ранее, наиболее точная оценка будет в диапазоне значений $M^2 = 1-2$. При больших уровнях СКО и, соответственно, снижении оптического качества излучения, соотношения (13) и (14) будут давать большую погрешность, хотя границы диапазона показателей оптического качества они будут определять верно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мелкомасштабные неоднородности зеркал оказывают серьезное влияние на оптическое качество излучения лазера с неустойчивым резонатором. Поскольку такие неоднородности часто носят неизбежный «технологический» характер, связанный с особенностями процесса изготовления зеркал, то их корректный учёт очень важен.

Для определения верхней и нижней границы, в которых будут находиться такие показатели оптического качества как угол расходимости излучения, параметр M^2 , число Штреля, можно использовать соотношения (13) и (14). Однако, следует понимать, что они дают лишь диапазоны значений параметров оптического качества, но не учитывают конкретный вид искажений формы зеркала, в частности, пространственный масштаб искажений, что очень важно для получения точных результатов. Наиболее точная оценка, которую можно получить с помощью указанных выражений, будет иметь место в диапазоне значений $M^2 = 1-2$.

В результате моделирования показано, что на показатели оптического качества будут сильно влиять параметры резонатора, в частности, коэффициент увеличения. С его ростом чувствительность резонатора к неоднородностям зеркал снижается, причём, достаточно резко. Оптимальным значением коэффициента

увеличения неустойчивого резонатора будет являться значение в диапазоне от 1,5 до 2,0, так как именно они обеспечивают с одной стороны низкую чувствительность резонатора к абберациям зеркал, а с другой стороны — высокую энергетическую эффективность.

Другим параметром, сильно влияющим на показатели оптического качества излучения, будет являться радиус корреляции искажений формы зеркала (его характерный про-

странственный масштаб). При малых радиусах корреляции, несмотря на то, что в этом случае обеспечивается определённая «самокомпенсация» неоднородностей и снижение СКО на выходе из резонатора, всё равно наблюдается резкое ухудшение оптического качества излучения, что связано с особым характером влияния мелкомасштабных неоднородностей ВФ на параметры излучения в дальней зоне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
2. Бореишо А.С., Дружинин С.Л., Лобачев В.В., Савин А.В., Страхов С.Ю., Трилис А.В. Неоднородности активной среды и оптическое качество излучения сверхзвуковых химических кислородно-йодных лазеров // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 9. С. 831–836. <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n09ABEH013487>
3. Lobachev V.V., Strakhov S.Yu. Regular and stochastic small-scale phase heterogeneities of gas lasers active medium and their influence on optical resonator efficiency // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering / Lasers for Measurements and Information Transfer. 2007. С. 659402.
4. Лобачев В.В., Страхов С.Ю. Эффективность неустойчивого резонатора мощного лазера со стохастическими фазовыми неоднородностями в активной среде // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 2. С. 134–138. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n02ABEH013114>
5. Иващенко А.В., Лобачев В.В., Страхов С.Ю., Трилис А.В. Термонапряжённое состояние и оптическое качество стеклянного активного элемента мощного твердотельного лазера // Инженерно-физический журнал. 1997. Т. 70. № 6. С. 1020–1024.
6. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. Термооптика твердотельных лазеров. Л: Машиностроение, 1986. 199 с.
7. Лобачев В.В., Страхов С.Ю. Пространственная многомасштабность фазовой абберации в крупногабаритных лазерных цилиндрических стеклянных матрицах // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 1. С. 66–69.
8. Савин А.В., Страхов С.Ю., Дружинин С.Л. Неустойчивые резонаторы мощных химических кислородно-йодных лазеров // Квантовая электроника. 2006. Т. 9. № 36. С. 867–873. <http://doi.org/10.1070/QE2006v036n09ABEH013407>
9. Страхов С.Ю., Сотникова Н.В., Киселев И.А., Балашов В.М. Крупномасштабные внутрирезонаторные неоднородности и их влияние на параметры излучения мощных лазеров // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 43–49. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-2-43-49>
10. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Сов. радио, 1971. 328 с.
11. Ковалевский В.О., Лобачев В.В. Оценка влияния регулярных и стохастических фазовых структур на оптическое качество потока активной среды газодинамического лазера // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 7. С. 604–610. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n07ABEH002012>

REFERENCES

1. Ananyev Yu.A. Optical resonators and the problem of divergence of laser radiation. Moscow: Nauka, 1979. 328 p.
2. Boreisho A.S., Druzhinin S.L., Lobachev V.V., Savin A.V., Strakhov S.Yu., Trilis A.V. Inhomogeneities of the active medium and optical quality of radiation of supersonic chemical oxygen-iodine lasers // Quantum Electronics. 2007. V. 37. № 9. P. 831–836. <http://doi.org/10.1070/QE2007v037n09ABEH013487>
3. Lobachev V.V., Strakhov S.Yu. Regular and stochastic small-scale phase heterogeneities of gas lasers active medium and their influence on optical resonator efficiency // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering / Lasers for Measurements and Information Transfer. 2007. P. 659402.
4. Lobachev V.V., Strakhov S.Yu. Efficiency of an unstable resonator of a high-power laser with stochastic phase inhomogeneities in an active medium // Quantum Electronics. 2006. V. 36. № 2. P. 134–138. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n02ABEH013114>
5. Ivashchenko A.V., Lobachev V.V., Strakhov S.Yu., Trilis A.V. Thermally stressed state and optical quality of the glass active element of a powerful solid-state laser [in Russian] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1997. V. 70. № 6. P. 1020–1024.
6. Mezenov A.V., Soames L.N., Stepanov A.I. Thermooptics of solid-state lasers. L: Mashinostroenie, 1986. 199 p.
7. Lobachev V.V., Strakhov S.Y. Spatial multi-scales of phase aberration in the large scale laser cylindrical glass matrixes // Journal of Optical Technology. 2000. V. 67. № 1. P. 54–66. <https://doi.org/10.1364/JOT.67.000054>
8. Savin A.V., Strakhov S.Yu., Druzhinin S.L. Unstable resonators of powerful chemical oxygen-iodine lasers // Quantum Electronics. 2006. V. 9. № 36. P. 867–873. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n09ABEH013407>
9. Strakhov S.Yu., Sotnikova N.V., Kiselev I.A., Balashov V.M. Intracavity large-scale heterogeneity and their influence on radiation parameters of powerful lasers // Questions of Radio Electronics. 2019. № 2. P. 43–49.
10. Bykov V.V. Digital modeling in statistical radio engineering. Moscow: Soviet Radio, 1971. 328 c.
11. Kovalevsky V.O., Lobachev V.V. Evaluation of the influence of regular and stochastic phase structures on the optical quality of the active medium flow of a gas-dynamic laser // Quantum Electronics. 2001. V. 31. № 7. P. 604–610. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n07ABEH002012>

АВТОРЫ

Сергей Юрьевич Страхов — доктор техн. наук, профессор, декан, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1713-522X>, strakhov_siu@voenmeh.ru

Наталья Викторовна Сотникова — канд. техн. наук, доцент, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-6380-9278>, sotnikova_nv@voenmeh.ru

Андрей Валерьевич Савин — доктор техн. наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-7931-2901>, savin_av@voenmeh.ru

AUTHORS

Sergey Yu. Strakhov — Dr.Sc., Professor, Docent, Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1713-522X>, strakhov_siu@voenmeh.ru

Natalia V. Sotnikova — PhD, Docent, Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6380-9278>, sotnikova_nv@voenmeh.ru

Andrey V. Savin — Dr.Sc., Professor, D.F. Ustinov Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-7931-2901>, savin_av@voenmeh.ru

Статья поступила в редакцию 27.09.2023
Одобрена после рецензирования 14.10.2023
Принята к печати 30.10.2023

The article was submitted to the editorial office 27.09.2023
Approved after review 14.10.2023
Accepted for publication 30.10.2023