

УДК 535.8

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Da, 42.60.By

Резонаторы твердотельных лазеров для изменения пространственных параметров пучка

П. А. Носов, В. И. Батшев

Рассмотрены резонаторы твердотельных лазеров, формирующие гауссов пучок с изменяемыми пространственными параметрами при неизменности энергетических параметров излучения. Разработана методика габаритного расчета таких резонаторов, учитывающая термооптические искажения твердотельных активных элементов (возникновение тепловой линзы) и стабильность параметров излучения к флуктуациям оптической силы тепловой линзы.

Ключевые слова: твердотельный лазер, лазерный резонатор, устойчивый резонатор, тепловая линза, лазерное излучение, гауссов пучок, перетяжка, вариосистема.

Введение

Оптический блок лазерных оптико-электронных приборов включает резонатор и внешнюю (вне резонатора лазера) оптическую систему. Обычно в резонаторе лазера формируют энергетические, временные, спектральные и поляризационные параметры излучения, а с помощью оптической системы – требуемые пространственные параметры пучка [1–7].

Разнообразие областей применения твердотельных лазеров выдвигает определенные требования к пространственным параметрам пучка. Перспективным направлением развития лазерных приборов и систем на базе твердотельных лазеров является разработка оптических систем для плавного изменения пространственных параметров лазерного пучка в широких пределах. Для этого применяют оптическую вариосистему, расположенную вне резонатора лазера [7–10]. Однако при больших значениях перепада увеличения количество компонентов такой вариосистемы увеличивается, усложняется система перемещения линз, и,

как следствие, повышаются требования к изготовлению и сборки, а также стоимость системы.

Целью данной работы является рассмотрение внутрирезонаторного способа изменения пространственных параметров гауссова пучка. В частности, представлены примеры, подтверждающие целесообразность предлагаемого способа формирования резонаторами твердотельных лазеров пучка с изменяемыми пространственными параметрами, а также эффективность разработанной методики расчета таких резонаторов.

Выбор схемы оптической системы резонатора

Твердотельные лазеры обладают определенной особенностью [3, 4, 11–13], а именно, в активном элементе при поглощении излучения источника оптической накачки и его охлаждении возникает неоднородный профиль распределения температуры. Термооптические искажения твердотельного активного элемента приводят к тому, что изначально оптически однородная активная среда перестает быть таковой. Кроме того, возникающие термооптические искажения отличаются для различных режимов генерации и нестабильны во времени, что вызвано различными причинами (флуктуации параметров накачки, нестационарный характер потока охлаждающей активной элемент жидкости, вибрации и др.). Поэтому термооптические неоднородности твердотельного активного элемента приближенно представляют в виде тепловой линзы с флуктуирующей оптической силой. В результате резонатор твердотельного лазера становится зеркально-линзовым.

Носов Павел Анатольевич¹, доцент, к.т.н.

Батшев Владислав Игоревич^{1,2}, доцент, научный сотрудник, к.т.н.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел. 8 (499) 263-65-93. E-mail: pan@bmstu.ru

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН).

Россия, 117342, Москва, ул. Бутилова, д. 15.
Тел. 8 (499) 263-63-80. E-mail: batshev.vlad@gmail.com

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2016 г.

© Носов П. А., Батшев В. И., 2017

Сформировать гауссов пучка с требуемым перепадом изменения пространственных параметров при постоянстве энергетических параметров излучения позволяет не любая схема оптической системы резонатора. Так, схемы резонаторов с линзоподобным активным элементом или дополнительной линзой (при возможности перемещения зеркал резонатора и дополнительной линзы) эту задачу не решают, т.к. имеет место изменение объема моды генерации в активном элементе при перемещении элементов резонатора, что является недопустимым.

Указанных недостатков лишена схема резонатора с линзоподобным твердотельным активным элементом и двухкомпонентной внутрирезонаторной вариосистемой, расположенных между плоскими зеркалами (см. рис. 1, а). Будем полагать, что вывод лазерного излучения производится через правое зеркало резонатора. Сразу отметим, что в этой схеме используется вариосистема с двумя подвижными компонентами, расчет которой должен производиться с учетом особенностей рассматриваемой задачи и по специальной методике расчета.

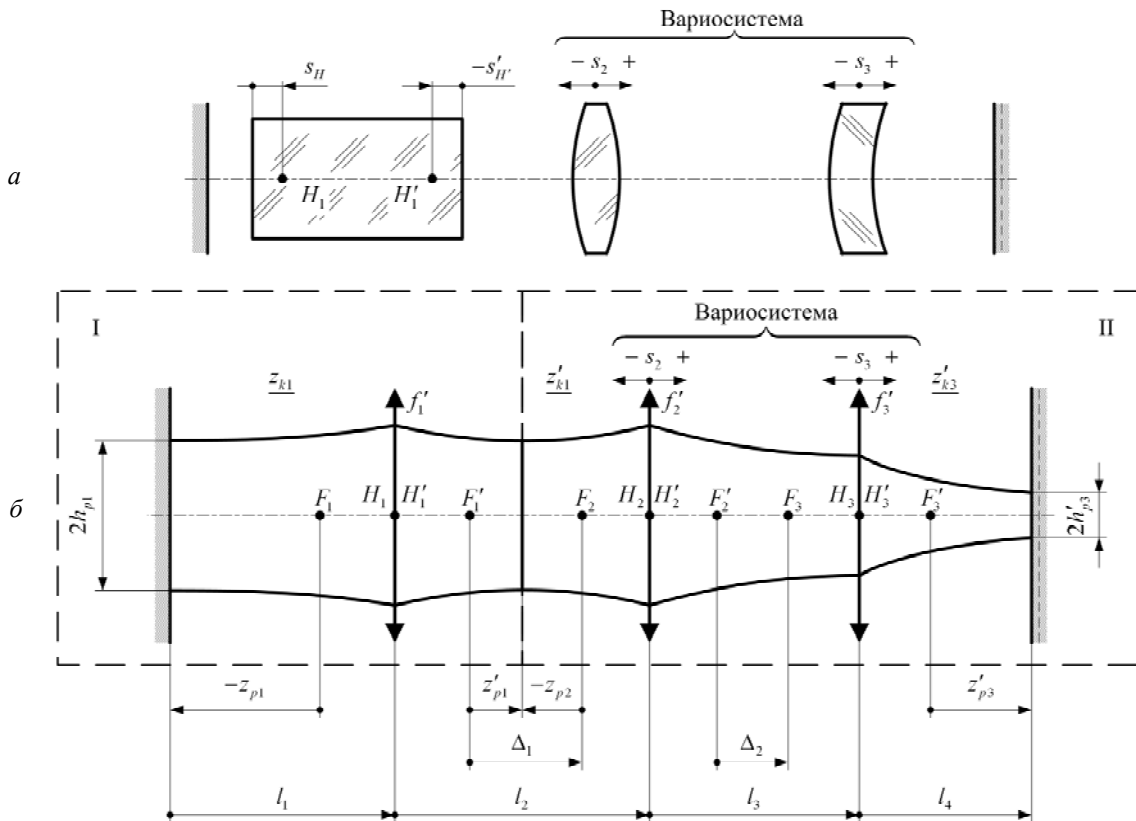


Рис. 1. Схема резонатора твердотельного лазера для формирования пучка с изменяемыми пространственными параметрами (а) и эквивалентная оптическая система резонатора (б): s_H и $s_{H'}$ – расстояния от торца активного элемента до главных точек тепловой линзы H и H' ; F_j, F'_j – передний и задний фокусы j -ой линзы резонатора ($j = 1, 2, 3$); f'_1 – заднее фокусное расстояние тепловой линзы; f'_2, f'_3 – задние фокусные расстояния компонентов вариосистемы; s_2, s_3 – перемещение компонентов вариосистемы (влево от нулевого положения – отрицательное, вправо – положительное).

Определив структуру оптической системы резонатора твердотельного лазера, рассмотрим задачу его габаритного расчета.

Габаритный расчет резонатора

Задача расчета резонатора состоит в определении конструктивных параметров оптической системы, формирующей лазерный пучок с требуемыми параметрами. Габаритный расчет резонатора проводится в параксиальной области, считая

оптические элементы резонатора идеальными (безабберационными) без каких-либо ограничений на структуру обобщенных компонентов вариосистемы (однолинзовые, многолинзовые и т. п.). Влияние aberrаций оптической схемы резонатора учитывается на заключительном этапе проектирования [12, 13].

Габаритный расчет – определяющий этап разработки лазерных оптических систем. Габаритный расчет резонатора для рассматриваемой задачи включает расчет исходной схемы резонатора и

определение закона перемещения компонентов оптической вариосистемы с требуемым перепадом изменения диаметра перетяжки на правом зеркале, конфокального параметра и угловой расходимости выходного пучка.

Стабильность выходных характеристик излучения по отношению к флуктуациям оптической силы тепловой линзы активного элемента обеспечивают схемы резонаторов с динамической стабильностью. Вопросы габаритного расчета схем устойчивых резонаторов с динамической стабиль-

ностью подробно рассмотрены в [11, 13]. Не останавливаясь подробно на этом вопросе, приведем лишь итоговые формулы для расчета параметров резонатора.

Для требуемых диаметров перетяжек на зеркалах резонатора $2h_{p1}$, $2h'_{p30}$, известном фокусном расстоянии тепловой линзы активного элемента f'_1 , задавая Δ_{10} , Δ_{20} , z'_{p30} (см. рис. 1, б), рассчитываем остальные параметры [13]:

$$\begin{aligned}
 f_{2,1,2}'^2 &= -\frac{2\Delta_{10}^2\Delta_{20}z_{k1}z'_{k30}}{f_1'^2(z'_{k30} \pm z'_{p30}) - 2\Delta_{10}z_{k1}z'_{k30}}, & f_{2,3,4}'^2 &= \frac{2\Delta_{10}^2\Delta_{20}z_{k1}z'_{k30}}{f_1'^2(z'_{k30} \pm z'_{p30}) + 2\Delta_{10}z_{k1}z'_{k30}}, \\
 f_{3,1,2}'^2 &= \pm \frac{\Delta_{20}f_1'^2(z'_{k30} \pm z'_{p30})^2}{f_1'^2(z'_{k30} + z'_{p30}) - 2\Delta_{10}z_{k1}z'_{k30}}, & f_{3,3,4}'^2 &= \pm \frac{\Delta_{20}f_1'^2(z'_{k30} \pm z'_{p30})^2}{f_1'^2(z'_{k30} + z'_{p30}) + 2\Delta_{10}z_{k1}z'_{k30}}, \\
 l_{10} &= f'_1 - \frac{f_1'^2}{2} \left\{ \frac{f_2'^2 z'_{p30}}{\Delta_{10} \left[(f_2'^2 - \Delta_{10}\Delta_{20})z'_{p30} + \Delta_{10}f_3'^2 \right]} - \frac{f_2'^2 - 2\Delta_{10}\Delta_{20}}{(f_2'^2 - \Delta_{10}\Delta_{20})\Delta_{10}} \right\}, \\
 l_{20} &= \Delta_{10} + f'_1 + f'_2, & l_{30} &= \Delta_{20} + f'_2 + f'_3, & l_{40} &= f'_3 + z'_{p30}, & l_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^4 l_{i0}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь и далее в исходном (нулевом) положении компонентов оптической системы резонатора ее параметры и параметры пучка будем обозначать с индексом «0»; z_{k1} и z'_{k3} – параметр конфокальности пучка в соответствующем плече резонатора (см. рис. 1, б), определяемый полудиаметром перетяжки гауссова пучка и длиной волны лазерного излучения λ : $z_k = \pi h_p^2 / \lambda$; Δ_1 и Δ_2 – оптический интервал – расстояние между задними фокусами предыдущих линз и передними фокусами последующих линз резонатора; z'_{p3} – положение перетяжки пучка относительно заднего фокуса третьей линзы резонатора; l_i – длины плеч резонатора ($i = 1, 2 \dots 4$); l_{Σ} – длина резонатора. Заметим, что величины z_p и z'_p , откладываемые вправо от фокусов линзы, являются положительными, влево – отрицательными.

Для определения закона перемещения компонентов вариосистемы рассматриваемый резонатор с тремя линзами удобно представить состоящим из двух элементов обращения волнового фронта гауссова пучка [12, 13]: первый элемент – левое плоское зеркало-тепловая линза, а второй элемент – внутрирезонаторная вариосистема – правое плоское зеркало (на рис. 1, б зеркально-линзовые элементы обращения волнового фронта гауссова пучка резонатора обозначены I и II соответственно). Такое представление сложной опти-

ческой системы резонатора позволяет рассмотреть задачу расчета вариосистемы отдельно. При этом важно иметь в виду, что данный оптический элемент обращает волновой фронт только пучка с вполне определенным параметром конфокальности z_k и положением сечения перетяжки z_p .

Определим требования к внутрирезонаторной вариосистеме для формирования пучка с изменяемыми параметрами и неизменности его энергетических параметров. При перемещении компонентов вариосистемы изменяются конфигурация резонатора и, как следствие, параметры формируемого гауссова пучка. Поэтому первое требование состоит в обеспечении постоянства размера пучка на тепловой линзе при перемещении компонентов вариосистемы. Поскольку зеркала устойчивого резонатора являются фазовыми поверхностями формируемого гауссова пучка, то при перемещении компонентов вариосистемы положение выходной перетяжки неизменно и находится на правом зеркале. Отсюда вытекает второе требование – вариосистема должна формировать перетяжку гауссова пучка, положение которой не меняется. Это требование соответствует следующему условию:

$$z'_{p3} + s_3 = z'_{p30}. \tag{2}$$

Используя формулы, описывающие преобразование гауссова пучка двухкомпонентной оп-

тической системой [5, 7, 14], условие (2) после преобразований может быть представлено в следующем виде:

$$a^2(1+x^2)y^3 + a[2ax - b(1+x^2)]y^2 + [a(a-2bx) + f_3'^2(1+x^2)]y + xf_3'^2 - ab = 0, \quad (3)$$

где $a = f_2'^2 / z_{k1}'$; $b = z_{k1}'x - z_{p20} + \Delta_{20} + z_{p30}'$; $x = (z_{p20} - s_2) / z_{k1}'$; $y = z_{k1}'\Delta_2 / f_2'^2$; z_{p20} и z_{k1}' – положение перетяжки относительно переднего фокуса второй линзы резонатора и параметр конфокальности пучка на входе вариосистемы, которые рассчитываются через коэффициент продольного увеличения тепловой линзы резонатора $\alpha_{\Gamma 1}$ по формулам:

$$\alpha_{\Gamma 1} = \frac{f_1'^2}{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}, \quad z_{p20} = -z_{p1}\alpha_{\Gamma 1} - \Delta_{10}, \quad (4)$$

$$z_{k1}' = z_{k1}\alpha_{\Gamma 1}.$$

Здесь $z_{p1} = f_1' - l_1$ – положение перетяжки пучка относительно переднего фокуса тепловой линзы.

Задавая перемещение первого компонента вариосистемы s_2 , из решения уравнения (3) находим y . Уравнение может иметь один или три действительных корня, из которых выбирается такой корень, который в исходном положении компонентов равен $z_{k1}'\Delta_{20} / f_2'^2$. Далее для каждого перемещения первого компонента вариосистемы рассчитываем соответствующий оптический интервал Δ_2 , перемещение второго компонента и длины плеч резонатора:

$$\Delta_2 = \frac{f_2'^2}{z_{k1}'} y, \quad s_3 = \Delta_2 - \Delta_{20} + s_2, \quad l_1 = l_{10}, \quad (5)$$

$$l_2 = l_{20} + s_2, \quad l_3 = \Delta_2 + f_2' + f_3', \quad l_4 = l_{40} - s_3.$$

В промежуточных положениях компонентов продольное увеличение вариосистемы $\alpha_{\Gamma \text{ var}}$, диаметр перетяжки на правом зеркале $2h'_{p3}$, угловая расходимость $2\theta'_3$ и параметр конфокальности z'_{k3} пучка в плече резонатора длиной l_4 определяются выражениями:

$$\alpha_{\Gamma \text{ var}} = \frac{(f_3'/f_2')^2}{(1+xy)^2 + y^2},$$

$$2h'_{p3} = 2h'_{p1}\sqrt{\alpha_{\Gamma \text{ var}}}, \quad 2\theta'_3 = \frac{2\theta'_1}{\sqrt{\alpha_{\Gamma \text{ var}}}}, \quad (6)$$

$$z'_{k3} = z'_{k1}\alpha_{\Gamma \text{ var}}.$$

здесь $2h'_{p1}$, $2\theta'_1$ – диаметр перетяжки и угловая расходимость пучка в плече резонатора длиной l_2 , т. е. параметры пучка на входе вариосистемы:

$$2h'_{p1} = 2h_{p1}\sqrt{\alpha_{\Gamma 1}}, \quad 2\theta'_1 = \frac{2\theta_1}{\sqrt{\alpha_{\Gamma 1}}}.$$

При проведении расчетов удобно пользоваться свойством инвариантности гауссова пучка при его преобразовании линзой [5, 7, 14]:

$$h_p\theta = h_p^2/z_k = h'_p\theta' = h_p'^2/z'_k = \text{const} = \lambda/\pi.$$

Запишем выражение для верхнего предела диаметра перетяжки на правом зеркале:

$$\left(M \frac{2h'_{p30}}{2h'_{p1}} \right)^2 = \frac{(f_3'/f_2')^2}{(1+xy)^2 + y^2}, \quad (7)$$

где $M = 2h'_{p3\text{max}} / 2h'_{p3\text{min}}$ – перепад линейного увеличения вариосистемы; $2h'_{p3\text{max}}$ и $2h'_{p3\text{min}}$ – максимальный и минимальный диаметр перетяжки на правом зеркале резонатора на всем диапазоне перемещения компонентов вариосистемы.

Совместное решение уравнений (6) и (7) позволяет определить диапазон перемещения компонентов вариосистемы, обеспечивающий требуемый перепад линейного увеличения M .

При расчете вариосистемы необходимо в промежуточных положениях контролировать «налезание» линз друг на друга и выходное зеркало ($l_3 > 0$, $l_4 > 0$), соблюдение минимально допустимого воздушного промежутка между тепловой линзой и первым компонентом вариосистемы ($l_2 > l_{2\text{min}}$), изменение диаметра пучка на тепловой линзе при флуктуации ее оптической силы, а также удовлетворение параметров схемы резонатора условию устойчивости ($0 < g_1g_2 < 1$). g -параметры резонатора с тремя линзами и плоскими концевыми зеркалами определяются следующими формулами [15]:

$$g_1 = (l_3 + l_4 - \Phi_3l_3l_4)(\Phi_1\Phi_2l_2 - \Phi_1 - \Phi_2) + (1 - \Phi_1l_2)(1 - \Phi_3l_4), \quad (8)$$

$$g_2 = (l_1 + l_2 - \Phi_1l_1l_2)(\Phi_2\Phi_3l_3 - \Phi_2 - \Phi_3) + (1 - \Phi_1l_1)(1 - \Phi_3l_3),$$

где $\Phi_j = 1/f_j'$ – оптическая сила j -ой линзы резонатора.

Расчет резонатора с помощью полученных соотношений допускает ситуации, когда имеется бесчисленное множество решений либо ни одного.

В первом случае для поиска лучшего решения используем целевую функцию; во втором случае для получения решения следует изменить предъявляемые к резонатору требования и для новых исходных данных повторить расчет.

Для селекции решений используем целевую функцию, учитывающую три параметра – длину резонатора, минимальное диафрагменное число компонентов вариосистемы и максимальное перемещение компонентов вариосистемы:

$$Fz = p_1 \frac{l_{\Sigma}}{m_l} + p_2 \frac{m_{Nd}}{Nd_{\min}} + p_3 \left| \frac{s_{\max}}{m_s} \right|, \quad (9)$$

где p_1, p_2, p_3 – весовые коэффициенты на длину резонатора, диафрагменное число компонентов вариосистемы и перемещение компонентов (назначаются оптиком-расчетчиком исходя из требований к резонатору); m_l, m_{Nd}, m_s – коэффициенты масштаба на соответствующий параметр целевой функции, которые рассчитываются как среднее значение по всем решениям.

После расчета целевой функции решения селектируются по ее убыванию. Параметры лучшей схемы резонатора соответствуют наименьшему значению целевой функции.

Отметим, что целевая функция (9) приведена в качестве одного из возможных вариантов. Оптиком-расчетчик может дополнить ее слагаемыми,

которые учитывают другие существенные для разрабатываемого резонатора лазера параметры.

Примеры расчета резонаторов

Пример 1. Требуется рассчитать параметры резонатора твердотельного лазера на АИГ:Nd³⁺ ($\lambda = 1,06$ мкм), в активном элементе которого возникает тепловая линза оптической силой 4 дптр. Резонатор должен формировать пучок со следующими параметрами: диаметр перетяжки пучка на левом зеркале 1,4 мм, диаметр перетяжки пучка на правом зеркале изменяется от 0,4 до 0,16 мм ($M = 2,5^x$). Длина резонатора не должна превышать 550 мм.

По формулам (1) находим параметры исходной схемы резонатора – фокусные расстояния компонентов вариосистемы и длины плеч резонатора: $f'_2 = 183,32$ мм, $f'_3 = -52,57$ мм, $l_{10} = 320,10$ мм, $l_{20} = 57,7$ мм, $l_{30} = 54,5$ мм, $l_{40} = 84,4$ мм. Длина рассчитанного резонатора 516,6 мм. На линзах резонатора диаметр формируемого гауссова пучка равен: $2h_{10} = 1,43$ мм, $2h_{20} = 1,12$ мм, $2h_{30} = 0,49$ мм.

Используя выражения (3)–(9), находим диапазон перемещения компонентов вариосистемы, на котором обеспечивается требуемый перепад увеличений (см. рис. 2, а). Произведение g-параметров резонатора изменяется от 0,28 (нулевое положение) до 0,02 (крайнее положение).

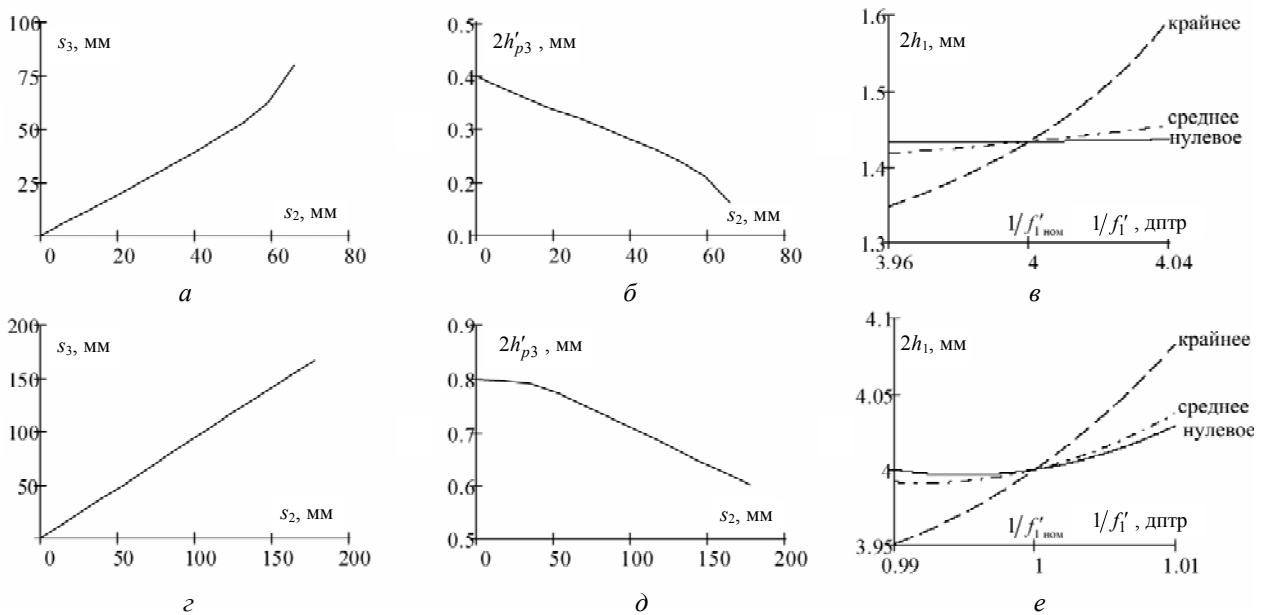


Рис. 2. Характеристические зависимости резонаторов: а, з – закон перемещения компонентов вариосистемы; б, д – зависимость диаметра пучка на правом зеркале резонатора (перетяжки выходного пучка) от величины перемещения первого компонента вариосистемы; в, е – зависимость диаметра пучка на тепловой линзе от ее оптической силы для нулевого, среднего и крайнего положений компонентов вариосистемы (изменение оптической силы тепловой линзы относительно номинального значения $1/f'_{1ном} \pm 1\%$).

Для рассчитанной схемы резонатора на рис. 2, б и в представлены различные зависимости, из которых видно: 1) при номинальной оптической силе тепловой линзы активного элемента $1/f'_{1ном}$ во всех положениях компонентов вариосистемы диаметр пучка на тепловой линзе одинаковый; 2) в промежуточных положениях компонентов вариосистемы имеет место не большое изменение диаметра пучка на тепловой линзе за счет флуктуации ее оптической силы (относительная нестабильность размера пучка в активном элементе при флуктуации оптической силы тепловой линзы в пределах $\pm 1\%$ не превышает 12%).

Пример 2. Требуется рассчитать параметры резонатора твердотельного лазера импульсного режима на АИГ:Nd³⁺ ($\lambda = 1,06$ мкм), в активном элементе которого возникает тепловая линза оптической силой 1 дптр. Резонатор должен обеспечивать большой объем моды генерации в активном элементе и формировать пучок со следующими параметрами: диаметр перетяжки на левом зеркале 4 мм, диаметр перетяжки на правом зеркале изменяется от 0,8 до 0,6 мм ($M = 4/3^x$). Длина резонатора не должна превышать 1 м.

Аналогично примеру 1, сначала определяем параметры исходной схемы резонатора: $f'_2 = 265,17$ мм, $f'_3 = -75,0$ мм, $l_{10} = 50,0$ мм, $l_{20} = 230,72$ мм, $l_{30} = 128,12$ мм, $l_{40} = 431,34$ мм. Длина резонатора 840,2 мм. На тепловой линзе и компонентах вариосистемы диаметр формируемого гауссова пучка равен: $2h_{10} = 4,0$ мм, $2h_{20} = 3,08$ мм, $2h_{30} = 1,08$ мм.

Закон перемещения компонентов вариосистемы представлен на рис. 2, г. При этом произведение g-параметров резонатора изменяется в диапазоне 0,47...0,36.

На рис. 2, д и е представлены зависимости, характеризующие рассчитанную схему резонатора. Анализ этих зависимостей позволяет сделать такие же выводы, как и для схемы примера 1. При этом относительная нестабильность размера пучка в активном элементе при флуктуации оптической силы тепловой линзы для примера 2 меньше и не превышает $2,1\%$.

Заключение

Предложен внутррезонаторный способ формирования гауссова пучка с изменяемыми пространственными и постоянными энергетическими параметрами излучения. Показано, что для решения этой задачи необходимо использовать схему резонатора с двухкомпонентной вариосистемой, в

которой перемещаются оба компонента по нелинейному закону.

Методика расчета резонаторов разработана на базе теории лазерной оптики с учетом особенностей формирования излучения твердотельными лазерами (термооптические искажения активного элемента, флуктуации оптической силы тепловой линзы). Приведены расчетные соотношения, позволяющие определить параметры исходной схемы резонатора и закон перемещения линз вариосистемы для обеспечения требуемого изменения диаметра перетяжки, параметра конфокальности и угловой расходимости выходного пучка.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ поддержки молодых российских ученых (№ МК-6960.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. – М.: Техносфера, 2008.
2. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрлов А. И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
3. Koehler W. Solid-state laser engineering. Sixth revised and updated edition. – New York: Springer, 2006.
4. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение. – М.: Радио и связь, 1994.
5. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествен В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы: учеб. пособие для вузов / под ред. И. И. Пахомова. – М.: Радио и связь, 1982.
6. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
7. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986.
8. Пахомов И. И. Панкратические системы. – М.: Машиностроение, 1976.
9. Ширанков А. Ф., Пахомов И. И., Иванов В. А., Анисанов А. Г., Штыков С. А., Носов П. А., Павлов В. Ю., Ширанков А. Ф. Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка: Патент РФ на изобретение № 2411598 от 10.02.2011. Бюл. № 4.
10. Пахомов И. И., Григорьянц А. Г., Носов П. А., Ширанков А. Ф., Хорохоров А. М., Павлов В. Ю., Третьяков Р. С., Ставертий А. Я., Голубенко Ю. В. Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера. Патент РФ на изобретение № 2488861 от 27.07.2013. Бюл. № 21.
11. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. – М.: Физматлит, 2004.
12. Пахомов И. И., Ширанков А. Ф. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Сер. Приборостроение. 2007. № 2. С. 95.
13. Pakhomov I. I., Nosov P. A. // Journal of Russian Laser Research. 2012. Vol. 33. No. 5. P. 409.
14. Анисанов А. Г., Пахомов И. И., Ширанков А. Ф. // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 30.
15. Nosov P. A., Pakhomov I. I., Shirankov A. F. // Physics of Wave Phenomena. 2011. Vol. 19. No. 3. P. 202.

Solid-state laser resonators for varying the spatial beam parameters

P. A. Nosov¹ and V. I. Batshev^{1,2}

¹ Bauman Moscow State Technical University
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, 105005, Russia
E-mail: pan@bmstu.ru

² Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
15 Butlerova str., Moscow, 117342, Russia
E-mail: batshev.vlad@gmail.com

Received December 1, 2016

The problems of the synthesis of stable resonators of solid-state lasers for varying the spatial parameters of formed beam while maintaining the energy radiation parameters are considered. The technique of dimensional synthesis of such resonators, which takes into account the thermo-optical distortions of solid-state active elements (a thermal lens) and the resistance of radiation parameters to the thermal fluctuations of the optical power of the thermal lens, is developed.

Keywords: solid-state laser, laser resonator, stable resonator, thermal lens, laser light, Gaussian beam, beam waist, zoom lens.

REFERENCES

1. J. Eichler and H.-J. Eichler, *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2006).
2. A. G. Grigoryants, I. N. Shiganov, and A. I. Misyurov, *Technological processes of laser treatment* (Moscow, BMSTU; 2006) [in Russian].
3. W. Koehner, *Solid-state laser engineering*. (New York: Springer; 2006).
4. G. M. Zverev and Yu. D. Golyaev, *Crystal lasers and their applications* (Moscow, Radio i Svyaz'; 1994) [in Russian].
5. I. I. Pakhomov, O. V. Rozhkov, and V. N. Rozhdestvin, *Optoelectronic quantum devices*. Ed by I. I. Pakhomov (Moscow, Radio i Svyaz'; 1982) [in Russian].
6. Yu. A. Anan'ev, *Optical cavities and laser beams* (Moscow, Nauka, Gl. Red. Fiz. Mat. Lit.; 1990) [in Russian].
7. I. I. Pakhomov and A. B. Tsibulya, *Calculation of the optical systems of laser devices* (Moscow, Radio i Svyaz'; 1986) [in Russian].
8. I. I. Pakhomov, *Zoom systems* (Moscow, Mashinostroenie; 1976) [in Russian].
9. A. F. Shirankov, I. I. Pakhomov, V. A. Ivanov, A. G. Anikanov, S. A. Shtykov, P. A. Nosov, and V. Yu. Pavlov, RF Patent No. 2411598 of February 02, 2011, Russian Bull of Inventions N4, 2011 [in Russian].
10. I. I. Pakhomov, A. G. Grigoryants, P. A. Nosov, A. F. Shirankov, A. M. Khorokhorov, V. Yu. Pavlov, R. S. Tretyakov, A. Ya. Stavertiy, and Yu. V. Golubenko, RF Patent No. 2488861 of July 27, 2013, Russian Bull of Inventions N21, 2013 [in Russian].
11. V. P. Bykov and O. O. Silichev, *Laser cavities*. (Moscow, Fizmatlit; 2004) [in Russian].
12. I. I. Pakhomov and A. F. Shirankov, Vest. MG TU im. N. É. Bauman, Ser. Priborostroenie, No. 2, 95 (2007).
13. I. I. Pakhomov and P. A. Nosov, Journal of Russian Laser Research **33** (5), 409 (2012).
14. A. G. Anikanov, I. I. Pakhomov, and A. F. Shirankov, Journal of Optical Technology **77** (2), 101 (2010).
15. P. A. Nosov, I. I. Pakhomov, and A. F. Shirankov, Physics of Wave Phenomena **19** (3), 202 (2011).