

П. А. Н о с о в

**СИНТЕЗ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО
РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА
С ИМПУЛЬСНОЙ НАКАЧКОЙ**

Рассмотрены вопросы расчета параметров резонатора твердотельного лазера с импульсной накачкой с учетом тепловой линзы, наводимой в активном элементе. Предложена методика расчета схем устойчивых конфигураций резонаторов, обеспечивающих большой коэффициент заполнения активного элемента излучением генерации и стабильность параметров излучения к флуктуациям оптической силы тепловой линзы.

E-mail: pan@bmstu.ru

Ключевые слова: лазерный резонатор, твердотельный лазер, импульсная накачка, тепловая линза, лазерное излучение, гауссов пучок.

Твердотельные лазеры с импульсной накачкой используют задачи, при решении которых требуются импульсы излучения с высокой пиковой мощностью. Энергетические, временные, спектральные и поляризационные характеристики лазерного излучения определяются конфигурацией резонатора [1–4]. С помощью оптической системы вне резонатора – лазерно-оптической системы – формируют требуемые пространственные параметры лазерного пучка. Структура и методика синтеза лазерно-оптической системы определяется ее назначением и параметрами исходного (преобразуемого) лазерного пучка, который сформирован резонатором [5, 6]. Поэтому резонатор является важнейшей частью лазерной системы, и все вопросы, связанные с формированием им излучения с необходимыми параметрами, следует рассматривать с учетом решаемой практической задачи.

Особенностью резонаторов твердотельных лазеров является изменение свойств активного элемента из-за возникновения неоднородного профиля распределения температуры [3, 7]. В результате активный элемент приобретает линзовые свойства. Это приводит к тому, что резонатор становится зеркально-линзовым.

Известно, что параметры лазеров не остаются строго постоянными во времени [1, 4]. Изменения параметров носят характер случайных колебаний (флуктуаций), причем среднее значение флуктуации в процессе эксплуатации лазера также изменяется. Стабильность можно рассматривать с точки зрения воспроизводимости параметров излучения от включения к включению или от импульса к импульсу.

В ряде случаев практического применения твердотельных лазеров с импульсной накачкой важна стабильность выходных параметров излучения, для чего используют активные или пассивные способы [4]. При активном способе измеряют выходной параметр лазерного излучения, который нужно стабилизировать, и воздействуют на соответствующий элемент лазера таким образом, чтобы скомпенсировать отличие этого параметра по сравнению с требуемым значением. Пассивные способы заключаются в разработке таких систем накачки и конфигураций резонаторов, которые обеспечивают стабильность интересующих параметров (параметра) в заданных пределах.

Эффективным пассивным способом стабилизации выходных параметров излучения лазера является применение так называемых динамически термостабильных резонаторов [3]. Параметры оптической схемы такого резонатора рассчитываются таким образом, что при номинальной мощности накачки размер моды h_T в активном элементе минимален и поэтому в первом приближении не зависит от изменения оптической силы $1/f_T'$ тепловой линзы: $dh_T/df_T' = 0$.

По сравнению с твердотельными лазерами с непрерывной накачкой, для лазеров с импульсной накачкой характерны меньшие термооптические искажения активного элемента и более высокие плотности мощности излучения на элементах резонатора [3, 8]. Поэтому, в твердотельных лазерах с импульсной накачкой оптимальный размер лазерной моды в активном элементе определяется не уровнем термооптических искажений, а радиусом активного элемента. Оптимальный размер основной моды в активном элементе $h_T \geq 1,5$ мм [3]. Однако, если предельно допустимая плотность мощности излучения на элементе резонатора, определяемая его лучевой стойкостью, равна I_{np} , а пиковая мощность импульса излучения $P = E/\tau$, где E – энергия, τ – длительность импульса генерации, то для предельно допустимого

размера пучка на элементе имеем условие $h_{np} \geq \sqrt{\frac{P}{\pi I_{np}}}$. В случае, ког-

да $I_{np} = 1,0$ ГВт/см²; $E = 0,1$ Дж, $\tau = 20$ нс, получаем $h_{np} \geq 0,4$ мм. Поэтому оптимальный размер пучка в активном элементе приблизительно в 4 раза больше минимально допустимого h_{np} .

Анализ схем устойчивых резонаторов показал, что для разработки твердотельных лазеров с импульсной накачкой можно использовать резонатор с двумя сферическими зеркалами и резонатор с двухкомпонентной оптической системой. В настоящей статье разработана методика синтеза указанных схем, которая позволяет провести расчет параметров резонатора лазера, обеспечивающего требуемые размеры пучка на зеркалах резонатора и в активном элементе, а также

стабильность выходных параметров излучения лазера к флуктуациям оптической силы тепловой линзы активного элемента.

Резонатор с двумя сферическими зеркалами. Рассмотрим двухзеркальный резонатор, в который помещен твердотельный активный элемент. В процессе работы лазера в активном элементе возникает тепловая линза, заднее фокусное расстояние которой f'_T считаем известным. Положение тепловой линзы относительно концевых зеркал определяется отрезками l_1 и l_2 (длина левого и правого плеча резонатора соответственно). Считаем, что вывод излучения осуществляется через правое полупрозрачное зеркало резонатора (рис. 1).

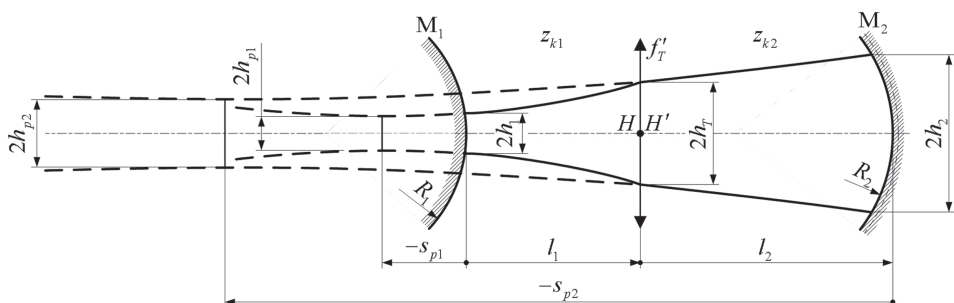


Рис. 1. Схема резонатора с двумя сферическими зеркалами и внутренней линзой:

R_1 и R_2 – радиусы кривизны зеркал; $2h_1, 2h_2$ – диаметры пучка на зеркалах; H, H' – главные точки тепловой линзы активного элемента; $z_{k1}, 2h_{p1}$ и $z_{k2}, 2h_{p2}$ – параметр конфокальности и диаметр сечения перетяжки пучка в левом и правом плечах резонатора соответственно; s_{p1}, s_{p2} – положения сечения перетяжки пучка относительно левого и правого зеркал резонатора

Требования к схеме резонатора твердотельного лазера с импульсной накачкой и параметрам формируемого пучка приводят к тому, что задача синтеза рассматриваемой схемы резонатора сводится к обеспечению требуемого размера основной моды на левом зеркале и тепловой линзе.

Параметры динамических термостабильных резонаторов удовлетворяющие условию

$$\left(\frac{1}{f'_T} - \frac{A_1}{B_1} - \frac{A_2}{B_2} \right)^2 = \frac{1}{B_2^2} - \frac{1}{B_1^2}, \quad (1)$$

приведены в работе [3]. Здесь A_1, B_1 и A_2, B_2 – элементы лучевых матриц обхода левого и правого плеч резонатора соответственно, не зависящие от фокусного расстояния тепловой линзы, которые для резонатора (см. рис. 1) имеют вид

$$A_1 = 1 - 2l_1/R_1, B_1 = 2l_1(1 - l_1/R_1), A_2 = 1 - 2l_2/R_2, B_2 = 2l_2(1 - l_2/R_2).$$

Можно показать, что при выполнении условия динамической стабильности для размера пучка h_1 на левом зеркале и тепловой линзе h_T справедливы выражения

$$h_1 = l_1 \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi B_1}}, \quad h_T = \sqrt{\frac{\lambda B_1}{\pi}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны лазерного излучения.

Из выражений (2) получаем формулу для определения длины левого плеча резонатора:

$$l_1 = \frac{\pi h_1 h_T}{\sqrt{2\lambda}}. \quad (3)$$

Поскольку $B_1 = 2l_1(1 - l_1/R_1)$, с учетом (2) и (3) получаем формулу для определения радиуса кривизны левого зеркала:

$$R_1 = \frac{\pi h_1^2 h_T}{(\sqrt{2}h_1 - h_T)\lambda}. \quad (4)$$

Для характерных значений h_1 и h_T из анализа выражения (4) следует, что левое зеркало резонатора является выпуклым ($R_1 < 0$).

Чтобы найти радиус кривизны выходного зеркала используем условие динамической стабильности резонатора (1). Для известного фокусного расстояния тепловой линзы активного элемента и заданной из конструктивных соображений длины правого плеча резонатора l_2 , рассчитываем R_2 по следующей формуле:

$$R_2 = \frac{(Cl_2 - 1)^2 + (l_2/B_1)^2}{C(Cl_2 - 1) + l_2/B_1^2},$$

при этом $C = 1/f_T' - A_1/B_1$.

Полученные выражения позволяют рассчитать параметры схемы резонатора, формирующего пучок с заданным размером в активном элементе, обеспечивающего лучевую стойкость зеркал и стабильность выходных параметров излучения. Получим теперь выражения, позволяющие рассчитать параметр конфокальности и положение сечения перетяжки формируемого пучка. Для этого используем зависимости изменения радиуса кривизны волнового фронта $R_\Phi(z)$ и размера пучка $h(z)$ от продольной координаты z [6]:

$$R_\Phi(z) = -z \left[1 + \left(\frac{z_k}{z} \right)^2 \right], \quad h(z) = \sqrt{\frac{\lambda z_k}{\pi}} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_k} \right)^2}. \quad (5)$$

Здесь знак радиуса кривизны волнового фронта R_Φ определяется правилом знаков в оптике; z_k – параметр конфокальности пучка; $z = 0$ – соответствует сечению перетяжки пучка.

Используя формулы (5) и учитывая, что радиус кривизны волнового фронта пучка в точке с координатой $z = -s_{p1}$ равен радиусу кривизны левого зеркала, на котором размер пучка равен h_1 (см. рис. 1), получаем систему двух уравнений для определения параметра конфокальности z_{k1} в левом плече резонатора и положения сечения перетяжки пучка s_{p1} относительно левого зеркала резонатора:

$$\begin{cases} \frac{z_{k1}^2 + s_{p1}^2}{s_{p1}} = R_1, \\ \frac{\lambda}{\pi} \frac{z_{k1}^2 + s_{p1}^2}{z_{k1}} = h_1^2. \end{cases}$$

Решение этой системы имеет вид

$$z_{k1} = R_1 \frac{u}{1 + u^2}, \quad s_{p1} = R_1 \frac{u^2}{1 + u^2}, \quad (6)$$

при этом $u = \pi h_1^2 / \lambda R_1$.

Для расчета параметров пучка в правом плече резонатора используем формулы преобразования гауссова пучка линзой [6]:

$$z_{k2} = z_{k1} \alpha_\Gamma, \quad s_{p2} = (l_1 - f'_T - s_{p1}) \alpha_\Gamma + f'_T - l_2, \quad h_{p2} = h_{p1} \sqrt{\alpha_\Gamma}, \quad 2\theta_2 = \frac{2\theta_1}{\sqrt{\alpha_\Gamma}}.$$

Здесь z_{k1} , s_{p1} – определяются (6); h_{p1} , $2\theta_1$ и h_{p2} , $2\theta_2$ – размер пучка в сечении перетяжки и угловая расходимость пучка в левом и правом плечах резонатора соответственно; α_Γ – продольное увеличение линзы, которое рассчитаем по формуле

$$\alpha_\Gamma = \frac{f_T'^2}{(l_1 - f'_T - s_{p1})^2 + z_{k1}^2}.$$

Вычислив параметры пучка в правом плече резонатора, находим размер пучка на правом зеркале резонатора: $h_2 = h_{p2} \sqrt{1 + (s_{p2}/z_{k2})^2}$.

Резонаторы с двухкомпонентной оптической системой. Схема рассматриваемого резонатора представлена на рис. 2. Задача расчета такой схемы состоит в определении параметров элементов резонатора (задних фокусных расстояний компонентов оптической системы (ОС), их взаимного расположения), при которых она удовлетворяет сформулированным выше требованиям.

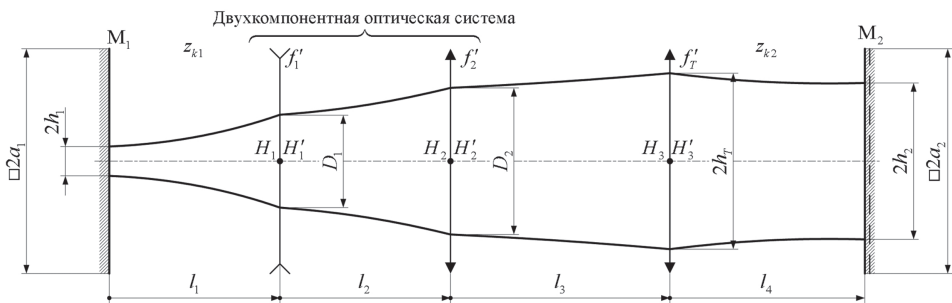


Рис. 2. Схема резонатора с двухкомпонентной оптической системой:

$2a_1, 2a_2$ – размеры зеркал квадратной апертуры; $2h_1$ и $2h_2$ – диаметры пучка на зеркалах; z'_{k1}, z'_{k2} – параметры конфокальности пучка около левого и правого зеркал соответственно; f'_1, f'_2 – задние фокусные расстояния компонентов ОС; $H_1, H_2, H_3, H'_1, H'_2, H'_3$ – главные точки компонентов; D_1 и D_2 – диаметры пучка на компонентах ОС; M_1 и M_2 – левое и правое зеркала резонатора соответственно; l_1, l_2, l_3, l_4 – длины плеч резонатора

Для получения расчетных соотношений приведем схему резонатора с двумя зеркалами и тремя линзами к эквивалентной с одной линзой, в качестве которой выступает тепловая линза активного элемента. Далее найдем изображение левого плоского зеркала через двухкомпонентную ОС. Для этого необходимо определить положение изображения вершины и центра кривизны левого плоского зеркала относительно положительного компонента ОС. Разница этих положений равна радиусу кривизны R'_1 левого зеркала M'_1 эквивалентной схемы (рис. 3, а), который определяется задними фокусными расстояниями компонентов ОС f'_1, f'_2 и длинами плеч резонатора l_1, l_2 :

$$R'_1 = \frac{f'_1 f'_2 \beta}{f'_1 + f'_2 - l_2}, \text{ где } \beta \text{ – линейное увеличение между плоскостями,}$$

соответствующие вершинам зеркал M_1 и M'_1 ,

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 - \frac{l_1}{f'_1}\right) \left(1 - \frac{l_2}{f'_2}\right) - \frac{l_1}{f'_2}.$$

Длина левого плеча эквивалентного резонатора (см. рис. 3, а) определяется по формуле

$$d = \left[\left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f'_1} \right) \left(1 - \frac{l_3}{f'_2} \right) + l_3 \left(1 - \frac{l_1}{f'_1} \right) \right] \beta.$$

Согласно работе [3], при $l_3 \neq f'_2$ лишь усложняется вывод расчетных соотношений для параметров рассматриваемой схемы резонатора. Поэтому рассмотрим случай $l_3 = f'_2$.

Для эквивалентного резонатора при $l_3 = f'_2$ выражения для длины левого плеча d и параметра B_1 в условии динамической стабильности (1) упрощаются:

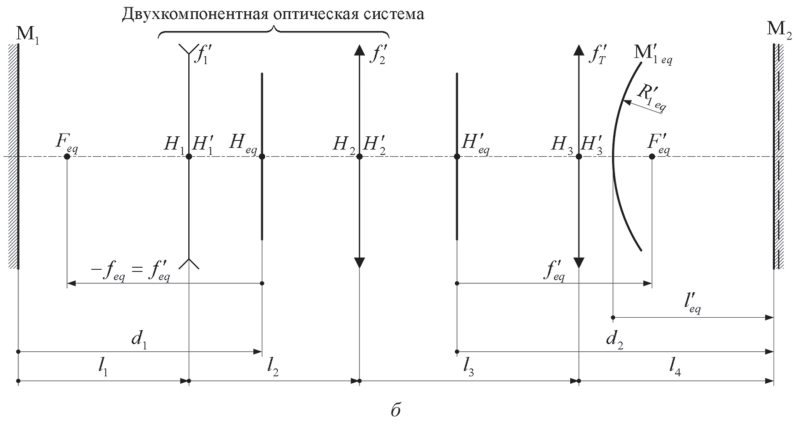
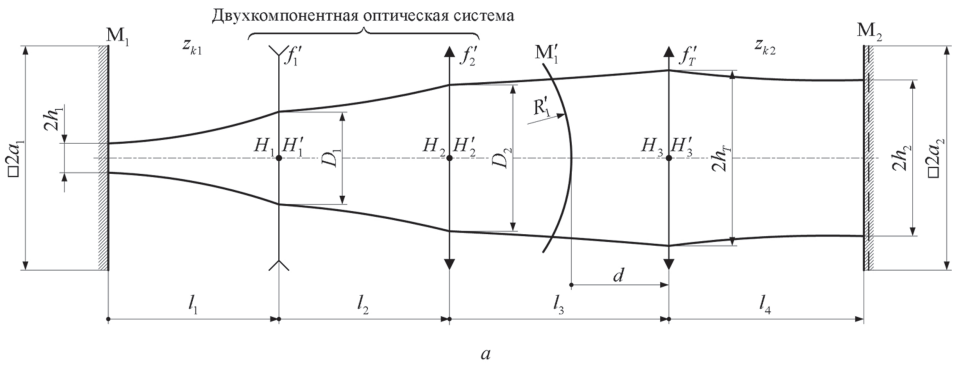


Рис. 3. К выводу расчетных соотношений для синтеза схемы резонатора с двухкомпонентной ОС (а) и анализу его свойств (б):

R'_1 – радиус кривизны левого зеркала M'_1 эквивалентного резонатора; d – расстояние от левого зеркала эквивалентного резонатора до тепловой линзы; $f'_{eq}, f'_{eq'}$ – переднее и заднее фокусные расстояния эквивалентной ОС из трех линз резонатора (линз двухкомпонентной ОС и тепловой линзы); H_{eq}, H'_{eq} – главные точки эквивалентной ОС из трех линз; d_1, d_2 – положения главных точек H_{eq}, H'_{eq} относительно концевых зеркал резонатора

$$d = \Gamma(l_1 - f'_1)\beta, B_1 = 2d(1 - d/R'_1) = 2\Gamma^2(l_1 - f'_1), \quad (7)$$

при этом $\Gamma = -f'_2/f'_1$.

Так как размер пучка на левом зеркале M'_1 эквивалентного резонатора $h'_1 = |\beta| h_1$, для рассматриваемой схемы резонатора размер пучка на левом плоском зеркале определяется следующим выражением (см. (2)):

$$h_1 = \frac{d}{|\beta|} \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi B_1}}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) позволяют получить соотношения для определения длины плеча резонатора l_1 и увеличения афокальной системы Γ :

$$l_1 = z_{k1} + f_1', \Gamma = \frac{h_T}{\sqrt{2h_1}}, \quad (9)$$

где $z_{k1} = \pi h_1^2 / \lambda$ – параметр конфокальности пучка около левого зеркала.

Из условия динамической стабильности (1) выразим A_1 . Учитывая, что для эквивалентного резонатора $A_2 = 1$, $B_2 = 2l_4$, получаем

$$A_1 = \frac{\pm \sqrt{B_1^2 - B_2^2} - B_1 + B_1 B_2 / f_T'}{B_2}.$$

Выбираем в решении для A_1 знак «+» перед радикалом, так как в этом случае $h_2 \approx h_T$. Если выбрать знак «-», то имеет место сильная фокусировка излучения на правом плоском зеркале, т. е. $h_2 \ll h_T$. Учитывая, что $A_1 = 1 - 2d/R_1'$, получаем формулу для определения длины плеча резонатора l_2

$$\begin{aligned} l_2 &= \frac{f_1'^2}{2(l_1 - f_1')} (1 - A_1) + f_1' + f_2' = \\ &= \frac{f_1'^2}{2(l_1 - f_1')} \left\{ 1 + \frac{\Gamma^2 (l_1 - f_1') (1 - 2l_4 / f_T') - \sqrt{[\Gamma^2 (l_1 - f_1')]^2 - l_4^2}}{l_4} \right\} + \\ &\quad + (1 - \Gamma) f_1'. \end{aligned} \quad (10)$$

Последнее выражение определяет расстояние между компонентами ОС, обеспечивающее для требуемых значений h_1 , h_T , f_T' и f_1' , l_4 динамическую стабильность резонатора.

Поскольку $l_4 / \Gamma^2 (l_1 - f_1') \ll 1$, учитывая разложение $\sqrt{1-t} \underset{t \rightarrow 0}{\approx} 1 - t/2$, формула (10) упрощается и преобразуется:

$$l_2 = (1 - \Gamma) f_1' + (p - 1/f_T') f_2'^2,$$

где $p = \frac{\lambda}{\pi h_T^2} \left(1 + \frac{l_4 \lambda}{\pi h_T^2} \right)$.

Приведем выражения для расчета диаметра пучка на компонентах ОС. Так, диаметр пучка D_1 на отрицательном компоненте ОС определяется формулой

$$D_1 = 2h_1 \sqrt{1 + (l_1 / z_{k1})^2}. \quad (11)$$

Чтобы найти диаметр пучка D_2 на положительном компоненте ОС воспользуемся методом сопряженных плоскостей [5, 6]. В нашем

случае линейное увеличение между сопряженными плоскостями равно $\beta_0 = 1 - l_2/f_1'$. Тогда диаметр пучка на втором компоненте ОС рассчитываем по следующей формуле (см. рис. 2):

$$D_2 = 2h_1 \sqrt{\beta_0^2 + \left(\frac{\beta_0 l_1 + l_2}{z_{k1}} \right)^2}. \quad (12)$$

Таким образом, формулы (9) – (12) позволяют рассчитать параметры схемы резонатора с двухкомпонентной ОС, при которых обеспечивается динамическая стабильность выходных параметров излучения. Рассчитанный по такому алгоритму резонатор обладает важной особенностью – эквивалентный ему резонатор является полуконфокальным. Чтобы подтвердить это, заменим систему из трех линз (линз ОС и тепловой линзы активного элемента) одной эквивалентной линзой. Заднее фокусное расстояние эквивалентной линзы f'_{eq} и положение ее главных точек H_{eq} , H'_{eq} относительно концевых зеркал резонатора (рис. 3, б) определяются выражениями:

$$f'_{eq} = \frac{1}{p\Gamma}, \quad d_1 = l_1 - f'_1 + \frac{1}{p\Gamma} \left(1 - \frac{1}{\Gamma} \right), \quad d_2 = l_4 - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{1}{\Gamma} \right).$$

Для эквивалентного резонатора отношение радиуса кривизны R'_{1eq} левого зеркала M'_{1eq} (является изображением левого плоского зеркала через эквивалентную линзу) к длине резонатора l'_{eq} определяется формулой

$$\frac{R'_{1eq}}{l'_{eq}} = 2 \frac{(\pi h_T^2)^3}{(\pi h_T^2 + l_4 \lambda) [\pi h_T^2 (\pi h_T^2 + l_4 \lambda) + (l_4 \lambda)^2]}.$$

Учитывая, что $l_4 \lambda \ll \pi h_T^2$, получаем $R'_{1eq}/l'_{eq} = 2$.

Поскольку эквивалентный резонатор является полуконфокальным, то он обладает свойствами симметричного конфокального резонатора. Известно [1–3, 8], что конфокальный резонатор имеет высокую селективность. Тогда для подавления высших поперечных мод достаточно обеспечить сравнительно небольшие потери основной моды. Поэтому рассчитанный по изложенному алгоритму резонатор обеспечивает одномодовый режим генерации лазера.

Число Френеля резонатора с двухкомпонентной ОС определяется формулой [9]

$$N = \frac{a_1 a_2}{\lambda (d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f'_{eq})} = \frac{2 a_1 a_2 \Gamma}{\pi h_T^2} = \frac{\sqrt{2} a_1 a_2}{\pi h_1 h_T},$$

где a_1, a_2 – апертурные размеры зеркал (см. рис. 2).

Определим параметры пучка в плече резонатора длиной l_4 . Используем для этого соотношения для параметров гауссова пучка на выходе трехкомпонентной ОС [6]:

$$z_{k2} = z_{k1} \alpha_{\Gamma eq}, \quad h_{p2} = h_{p1} \sqrt{\alpha_{\Gamma eq}}, \quad 2\theta_2 = \frac{2\theta_1}{\sqrt{\alpha_{\Gamma eq}}}.$$

Здесь параметры пучка с индексом «1» соответствуют параметрам пучка около левого зеркала; $\alpha_{\Gamma eq}$ – продольное увеличение трехкомпонентной ОС вычисляем по формуле

$$\alpha_{\Gamma eq} = \frac{(f'_1 f'_2 f'_T)^2}{\left[(f'_1 - l_1)(\Delta_1 \Delta_2 - f_2'^2) + f_1'^2 \Delta_2 \right]^2 + \left[z_{k1} (\Delta_1 \Delta_2 - f_2'^2) \right]^2},$$

где $\Delta_1 = l_2 - f'_1 - f'_2$, $\Delta_2 = l_3 - f'_2 - f'_T$.

Рассмотрим для примера расчет параметров резонатора мощного лазера на АИГ: Nd^{3+} ($\lambda = 1,06$ мкм), в активном элементе которого возникает тепловая линза с задним фокусным расстоянием $f'_T = 1$ м. Резонатор должен обеспечивать $h_1 = 0,4$ мм и $h_T = 2$ мм.

Будем полагать, что имеется отрицательная линза двухкомпонентной ОС, заднее фокусное расстояние которой равно $f'_1 = -75$ мм. Используя формулы (9), находим $l_1 = 399,2$ мм и $\Gamma = 3,54^\times$. Полагая, что $l_4 = 50$ мм, по формуле (10) рассчитываем $l_2 = 125,81$ мм. Поскольку $f'_2 = -\Gamma f'_1 = 265,17$ мм, получаем $l_3 = f'_2 = 265,17$ мм. На компонентах ОС диаметр формируемого резонатором пучка (см. (11) и (12)): $D_1 = 1,05$ мм, $D_2 = 2,94$ мм. Длина рассчитанного резонатора $L_{\text{рез}} = 840$ мм.

Для рассчитанной схемы резонатора на рис. 4 приведена зависимость размера пучка в активном элементе от оптической силы

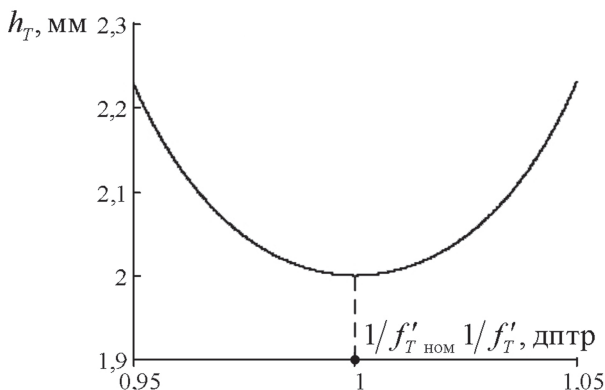


Рис. 4. Зависимость размера пучка в активном элементе от оптической силы тепловой линзы:

$1/f'_{T \text{ ном}}$ – номинальное значение оптической силы тепловой линзы

тепловой линзы при ее изменении от номинального значения в диапазоне $\pm 5\%$. Относительная нестабильность размера пучка в активном элементе не превышает 12% .

Сравнительный анализ схем резонаторов. Для рассмотренных в работе схем резонаторов полученные соотношения позволяют построить зависимости длины резонатора $L_{\text{рез}}$ от размера пучка h_T на тепловой линзе активного элемента. Зависимости представлены на рис. 5, где 1 и 2 соответствуют резонатору со сферическими зеркалами, а зависимости 3–5 – резонатору с двухкомпонентной ОС.

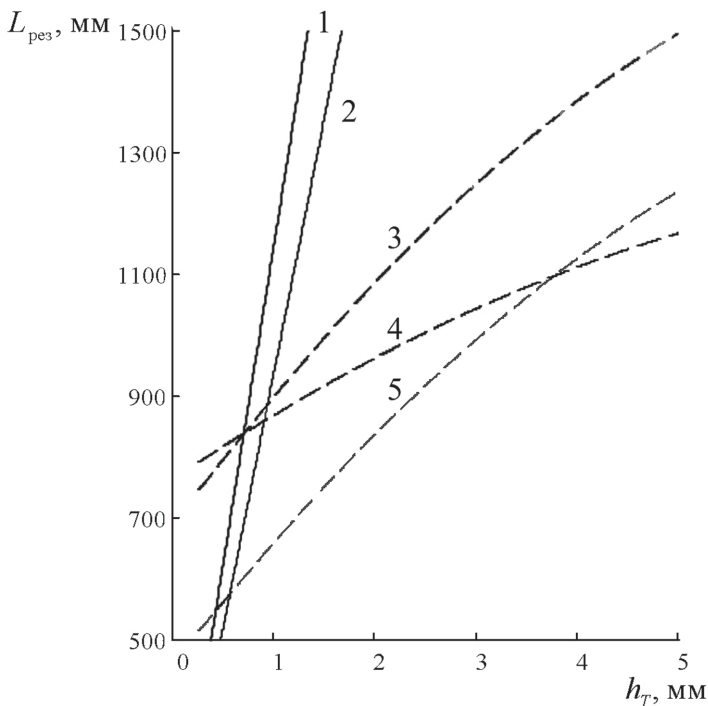


Рис. 5. Зависимости длины резонатора от размера пучка на тепловой линзе активного элемента:

1 – $h_1 = 0,5$ мм, $l_2 = 100$ мм; 2 – $h_1 = 0,4$ мм, $l_2 = 100$ мм; 3 – $h_1 = 0,5$ мм, $f'_1 = -80$ мм, $f'_T = 1$ м, $l_4 = 100$ мм; 4 – $h_1 = 0,5$ мм, $f'_1 = -40$ мм, $f'_T = 0,5$ м, $l_4 = 100$ мм; 5 – $h_1 = 0,4$ мм, $f'_1 = -60$ мм, $f'_T = 1$ м, $l_4 = 100$ мм; $\lambda = 1,06$ мкм

Анализ этих зависимостей показывает, что при большом заполнении активного элемента модой излучения требованию компактности удовлетворяет резонатор с двухкомпонентной ОС. Однако такие резонаторы содержат два дополнительных элемента – компоненты ОС. Уменьшить количество элементов можно за счет обработки левого торца активного элемента под выпуклую сферическую поверхность, радиус кривизны R_C которой связан с фокусным расстоянием

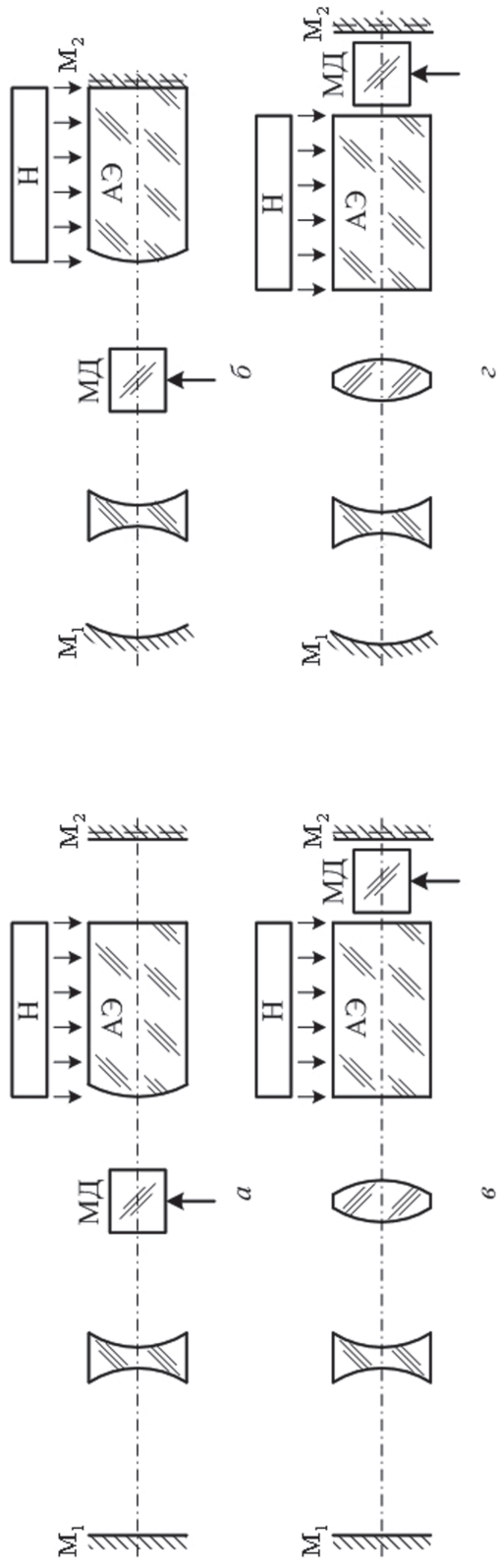


Рис. 6. Схемы резонаторов импульсных твердотельных лазеров с двухкомпонентной ОС:

M_1, M_2 – зеркала резонатора; $АЭ$ – активный элемент; H – накачка; $МД$ – активный модулятор добротности; *а, в* – резонатор с плоскими зеркалами; *б, г* – резонатор с левым сферическим зеркалом

положительного компонента ОС соотношением: $R_S = (n - 1) f_2'$, где n – показатель преломления активного элемента на длине волны генерации лазерного излучения. Другой способ уменьшить длину резонатора с двухкомпонентной ОС состоит в использовании схемы резонатора с левым сферическим зеркалом.

Варианты схем резонаторов импульсных твердотельных лазеров с двухкомпонентной ОС и активной модуляцией представлены на рис. 6.

Выводы. В работе рассмотрены два вида схем резонаторов твердотельных лазеров с импульсной накачкой: резонатор с двумя сферическими зеркалами и резонатор с двухкомпонентной оптической системой. Для данных схем лазерных резонаторов приведен алгоритм расчета параметров схемы резонатора, который формирует пучок с большим размером моды в активном элементе и обеспечивает стабильность выходных параметров излучения лазера к флуктуациям оптической силы тепловой линзы. Сравнительный анализ показал, что для большого заполнения активного элемента лазерной модой резонатор с двухкомпонентной оптической системой в большей степени удовлетворяет требованию компактности. Кроме того, такая схема обладает высокой селективностью при генерации основной поперечной моды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А н а н ь е в Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 264 с.
2. П а х о м о в И. И., Р о ж к о в О. В., Р о ж д е с т в и н В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы: Учеб. пособие для вузов / под. ред. И.И. Пахомова. – М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
3. Б ы к о в В. П., С и л и ч е в О. О. Лазерные резонаторы. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
4. К л и м к о в Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.
5. К л и м к о в Ю. М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
6. П а х о м о в И. И., Ц и б у л я А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986. – 152 с.
7. З в е р е в Г. М., Г о л я е в Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение. – М.: Радио и связь: Рикел, 1994. – 312 с.
8. В а х и т о в Н. Г., И с а е в М. П., К у ш н и р В. Р., Ш а р и ф Г. А. Сравнительный анализ резонаторов одномодовых лазеров // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 8. – С. 1633–1637.
9. Н о с о в П. А., П а х о м о в И. И., Ш и р а н к о в А. Ф. Анализ и синтез зеркально-линзовых резонаторов // Оптический журнал. 2010. – Т. 77, № 1. – С. 28–35.

Статья поступила в редакцию 30.05.2012