

11, ноябрь 2015

УДК 535.8

Синтез оптической системы для формирования пучка излучения мощного волоконного лазера

Ромашенко Д. В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Чэнь Инь, магистр

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Научные руководители: Ширанков А. Ф., к.т.н, доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Носов П. А., к.т.н, доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

pan@bmstu.ru

Введение

В настоящее время газолазерная обработка материалов является широко распространённой по сравнению с механическими методами. Это вызвано её преимуществами, самыми значимыми из которых являются высокая скорость и качество, а также низкая стоимость выполнения операций [1]. Наиболее распространёнными для этих целей являются волоконные и CO_2 - лазеры. При обработке листовых металлов небольшой толщины (до 3-4 мм) волоконные лазеры дают преимущество в скорости обработки [2]. Однако, при увеличении толщины обрабатываемого материала CO_2 лазеры обеспечивают более высокое качество реза, что позволяет им сохранять высокие позиции на рынке [1]. Другим важным преимуществом волоконных лазеров является спектральная характеристика их излучения (центральная длина волны $\lambda_0 \sim 1$ мкм), в отличие от CO_2 лазера ($\lambda_0 = 10,6$ мкм). Это позволяет с использованием волоконных лазеров обрабатывать такие материалы, как медь, титан и латунь [3].

В зависимости от типа и толщины обрабатываемого материала, помимо уровня мощности, необходимо обеспечивать требуемые пространственные параметры лазерного пучка [1]. В связи с этим особый интерес представляют разработка и проектирование лазерных оптических систем (ЛОС), позволяющих получить «оптимальные» для конкретной технологической операции по лазерной обработке материала параметры пучка [4].

В данной статье описан принцип построения и генерации излучения мощными волоконными лазерами. Также проведен сравнительный анализ одно- и двухкомпонентных ЛОС с различными конструктивными параметрами, обеспечивающими заданную конфигурацию пучка в зоне обработки материала.

1. Особенности мощных волоконных лазеров

Лазер – устройство, генерирующее и усиливающее электромагнитные колебания за счет эффекта вынужденного излучения. Основными элементами лазера являются активная среда (АС), резонатор и источник накачки [5]. В волоконных лазерах роль активной среды играет оптическое волокно, легированное («активированное») редкоземельными элементами, такими как иттербий ($\lambda_0 \approx 1,1$ мкм), эрбий ($\lambda_0 \approx 1,5$ мкм), или тулий ($\lambda_0 \approx 2$ мкм) [6]. На рисунке 1 представлена упрощенная схема построения волоконного лазера.

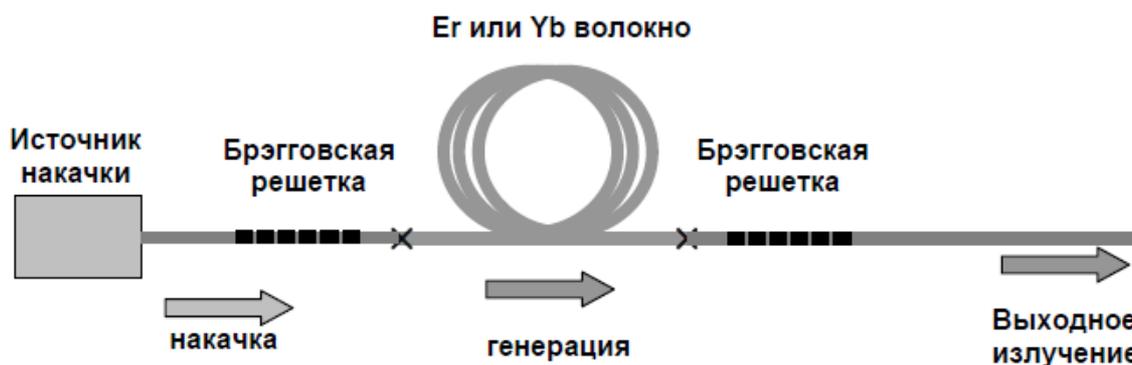


Рис. 1. Схема волоконного лазера с торцевой накачкой

В качестве «зеркал резонатора» в волоконных лазерах часто используются брэгговские решетки, прозрачные на длине волны генерации. Они имеют коэффициент отражения на рабочей длине волны до 99%; для побочных длин волн его величина не превышает 1% [6]. Излучение накачки должно беспрепятственно проходить в АС и, в то же время, не

«загрязнять» спектр выходного излучения, что учитывается при проектировании брэгговских решеток.

Средняя выходная мощность одиночного модуля волоконного лазера составляет 600 Вт [3], в то время как для обработки листовых металлов требуются мощность порядка кВт [7]. Для обеспечения возможности обработки металла при меньших значениях мощности необходимо обеспечивать достаточно малый диаметр выходного пучка, что конструктивно затруднено [1]. Эту проблему решают посредством использования многомодульной схемы построения волоконного лазера.

В работе [3] описана конструкция, состоящая из 7 волоконных лазерных модулей. Каждый из них имеет независимую систему диодной накачки и обеспечивает выходную мощность 600 Вт. При помощи пассивного волоконного смесителя излучение от модулей «суммируется» (см. рис. 2), позволяя получать общую величину выходной мощности 4,2 кВт.

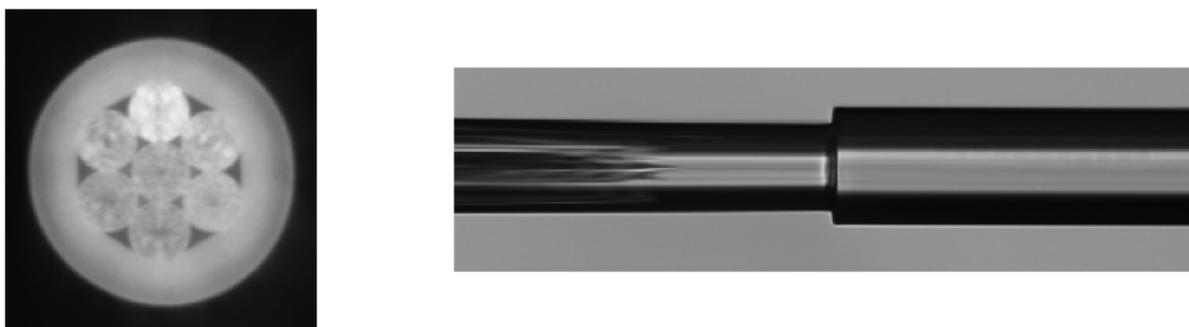


Рис. 2. Поперечное (слева) и продольное (справа) сечения смесителя

В качестве АС было использовано иттербиевое волокно с центральной длиной волны генерации 1081 нм и шириной спектральной линии 1,2 нм. Выходная мощность каждого блока (а, следовательно, и ее суммарное значение) может варьироваться на программном уровне (изменением режима работы систем накачки).

2. Оптические системы для мощных волоконных лазеров

Лазерное излучение характеризуется спектральными, энергетическими, временными, поляризационными и пространственными параметрами.

К спектральным параметрам относятся центральная длина волны и ширина спектральной линии излучения (по заданному уровню). Энергетическими параметрами являются мощность излучения, а также плотность мощности в рабочей плоскости [7],

представляющая собой отношение мощности излучения к площади пучка в зоне обработки материала [5].

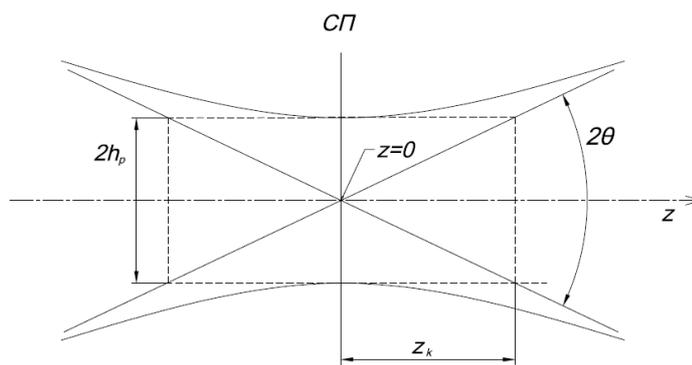


Рис. 3. Пространственная структура лазерного пучка

Пространственными параметрами лазерного пучка (см. рис. 3) являются радиус (или диаметр) перетяжки h_p ($2h_p$), конфокальный параметр z_k и угол расходимости пучка 2θ . Указанные величины связаны между собой через инвариант лазерного пучка [8]:

$$\theta \cdot h_p = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi}, \quad (1)$$

$$h_p = \sqrt{M^2 \frac{\lambda}{\pi} z_k}, \quad (2)$$

где M^2 - параметр качества лазерного пучка, $M^2 \geq 1$.

2.1 Однокомпонентная лазерная оптическая система

На рисунке 4 схематично представлено преобразование лазерного пучка однокомпонентной оптической системой. При прохождении лазерного пучка через оптическую систему изменяются пространственные параметры пучка [8]:

$$\begin{aligned} h'_p &= h_p \cdot \sqrt{\alpha}, \\ z'_k &= z_k \cdot \alpha, \\ z'_p &= -z_p \cdot \alpha, \\ \theta' &= \frac{\theta}{\sqrt{\alpha}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где α - продольное увеличение, вычисляемое по формуле:

$$\alpha = \frac{f'^2}{z_p^2 + z_k^2}; \quad (4)$$

где f' – эквивалентное фокусное расстояние преобразующей оптической системы, z_k – конфокальный параметр пучка; z_p – расстояние от перетяжки входного пучка до переднего фокуса оптической системы. В приведённых формулах величины со штрихом соответствуют выходному лазерному пучку. В частности, z'_p – положение выходной перетяжки относительно заднего фокуса оптической системы.

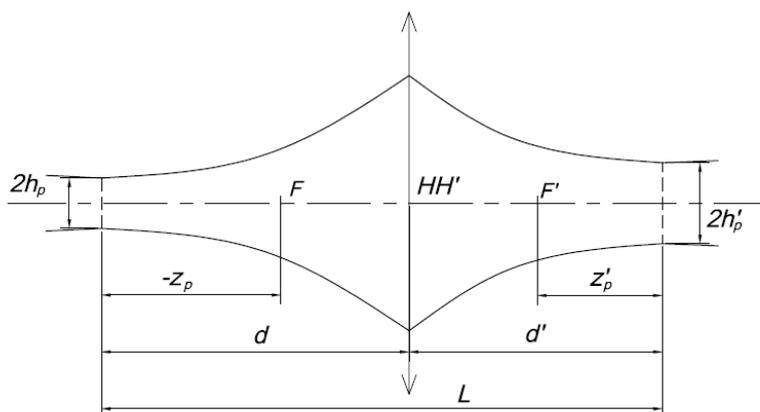


Рис. 4. Преобразование лазерного пучка однокомпонентной оптической системой

Далее для удобства расчетов вводим параметры d и d' (см. рис. 4):

$$d = f' - z_p,$$

$$d' = f' + z'_p = f' - z_p \cdot \alpha.$$

Исходными данными для расчета параметров однокомпонентной оптической системы являются:

- размер входной и выходной перетяжек – h_p и h'_p ;
- параметр качества пучка M^2 ;
- рабочая длина волны излучения волоконного лазера λ ;
- диапазон положения входной перетяжки относительно оптической системы (расстояние d).

Сначала определяем требуемое значение параметра α и величину конфокального параметра z_k преобразуемого пучка по формулам [8]:

$$\alpha = \left(\frac{h'_p}{h_p} \right)^2, \quad (5)$$

$$z_k = \frac{\pi \cdot h_p^2}{M^2 \cdot \lambda}, \quad (6)$$

Далее вычисляется отрезок d' с учетом ограничения d'_{\min} :

$$d' = \pm z_k \sqrt{\alpha(\alpha_d - \alpha)}, \quad (7)$$

где $\alpha_d = 1 + \left(\frac{d}{z_k} \right)^2$.

После этого рассчитывается фокусное расстояние, световой диаметр и диафрагменное число однокомпонентной преобразующей оптической системы [8]:

$$f'_{1,2} = \frac{\alpha \cdot d \pm d'}{\alpha - 1}, \quad (8)$$

$$D_{св.} = 2 \cdot h_p \cdot k_d \sqrt{\alpha_d}, \quad (9)$$

$$N_d = \frac{|f'|}{D_{св.}}, \quad (10)$$

где k_d - коэффициент запаса, принятый равным 2,5.

Для селекции результатов используется целевая функция. Причём она была задана в двух вариантах:

$$Fz_i = \frac{1}{N_{di}}, \quad (11)$$

$$Fz_i = P_1 \cdot \frac{L_i}{M_1} + P_2 \cdot \frac{M_2}{N_{di}}, \quad (12)$$

где $M_1 = \max[L_i]$, $M_2 = \max[N_d]$, P_1 и P_2 - весовые коэффициенты, принятые равные 0,3 и 0,7 соответственно.

При использовании целевой функции в виде (12) помимо диафрагменного числа также учитывается общая длина лазерной оптической системы. Система с минимальным значением целевой функции обладает наибольшим относительным отверстием.

¹ При $\alpha=1$ фокусное расстояние вычислялось по формуле (4).

Результаты расчетов приведены в таблицах ниже. Целевая функция каждого решения таблицы 1 рассчитывается по формуле (11), а таблицы 2 – формуле (12).

Таблица 1

Конструктивные параметры однокомпонентной лазерной оптической системы

$h_p = 0,025 \text{ мм}, h'_p = 0,025 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 1$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	30,0	30,0	15,001	60,0	12,067	1,243	0,804
2	35,0	35,0	17,501	70,0	14,078	1,243	0,804
3	40,0	40,0	20,001	80,0	16,089	2,243	0,804
4	45,0	45,0	22,501	90,0	18,100	2,243	0,804
5	50,0	50,0	25,001	100,0	20,111	2,243	0,804
$h_p = 0,05 \text{ мм}, h'_p = 0,05 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 1$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	30,0	30,0	15,025	60,0	6,038	2,488	0,402
2	35,0	35,0	17,522	70,0	7,043	2,488	0,402
3	40,0	40,0	20,019	80,0	8,048	2,487	0,402
4	45,0	45,0	22,517	90,0	9,053	2,487	0,402
5	50,0	50,0	25,015	100,0	10,058	2,487	0,402
$h_p = 0,05 \text{ мм}, h'_p = 0,075 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 2,25$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	80,0	119,98	239,98	199,98	16,09	14,914	0,067
2	75,0	112,48	224,98	187,48	15,08	14,914	0,067
3	70,0	104,97	209,98	174,97	14,08	14,914	0,067
4	65,0	97,48	194,98	162,48	13,07	14,913	0,067
5	60,0	89,98	179,98	149,98	12,07	14,912	0,067

Конструктивные параметры однокомпонентной лазерной оптической системы

$h_p = 0,025 \text{ мм} , h'_p = 0,025 \text{ мм} , M^2 = 5,85 , \lambda = 1,07 \text{ мкм} , \alpha = 1$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	30,0	30,0	15,001	60,0	12,067	1,243	0,772
2	35,0	35,0	17,501	70,0	14,078	1,243	0,784
3	40,0	40,0	20,001	80,0	16,089	2,243	0,796
4	45,0	45,0	22,501	90,0	18,100	2,243	0,808
5	50,0	50,0	25,001	100,0	20,111	2,243	0,820
$h_p = 0,05 \text{ мм} , h'_p = 0,05 \text{ мм} , M^2 = 5,85 , \lambda = 1,07 \text{ мкм} , \alpha = 1$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	30,0	30,0	15,025	60,0	6,038	2,488	0,772
2	35,0	35,0	17,522	70,0	7,043	2,488	0,784
3	40,0	40,0	20,019	80,0	8,048	2,487	0,796
4	45,0	45,0	22,517	90,0	9,053	2,487	0,808
5	50,0	50,0	25,015	100,0	10,058	2,487	0,820
$h_p = 0,05 \text{ мм} , h'_p = 0,075 \text{ мм} , M^2 = 5,85 , \lambda = 1,07 \text{ мкм} , \alpha = 2,25$							
№	$d, \text{ мм}$	$d', \text{ мм}$	$f', \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{\text{св.}}, \text{ мм}$	N_d	F_z
1	30,0	44,95	89,96	74,95	6,04	14,898	0,813
2	35,0	52,46	104,97	87,46	7,04	14,903	0,832
3	40,0	59,96	119,97	99,96	8,05	14,906	0,850
4	45,0	67,46	134,97	112,46	9,05	14,908	0,869
5	50,0	74,97	149,98	124,97	10,06	14,910	0,888

Анализируя полученные результаты, видно, что величина диафрагменного числа, практически не меняется (отличий до третьего знака после запятой не наблюдается). При условии обеспечения минимальной длины преобразующей оптической системы для селекции результатов следует использовать оценочную функцию, имеющую вид (12).

2.2 Двухкомпонентная лазерная оптическая система.

На рисунке 5 представлена схема двухкомпонентной ЛОС.

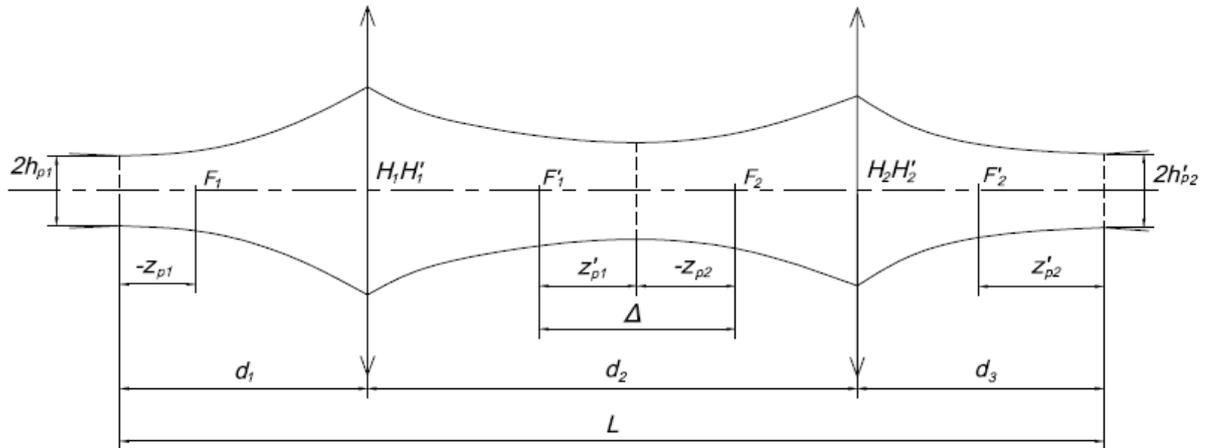


Рис. 5. Преобразование лазерного пучка двухкомпонентной оптической системой

Каждый из компонентов оптической системы преобразует лазерный пучок с учетом своего продольного увеличения α_i , $i = 1, 2$ [8]:

$$\alpha_1 = \frac{f_1'^2}{z_{p1}^2 + z_{k1}^2},$$

$$\alpha_2 = \frac{f_2'^2}{z_{p2}^2 + z_{k2}^2},$$
(13)

Пространственные параметры лазерного пучка на входе второго компонента определяются соотношениями:

$$z_{k2} = z'_{k1} = z_{k1} \cdot \alpha_1,$$

$$h_{p2} = h'_{p1} = h_{p1} \cdot \sqrt{\alpha_1},$$

$$\theta_2 = \theta'_1 = \frac{\theta_1}{\sqrt{\alpha_1}}.$$
(14)

Общий коэффициент преобразования для двухкомпонентной ЛОС будет определяться выражением:

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2.$$
(15)

При помощи математических преобразований, а также учитывая, что $z'_{p1} - z_{p2} = \Delta$, где Δ - оптический интервал, соответствующий расстоянию между фокусами компонентов (см. рис. 5), можно получить следующее выражение для продольного увеличения α двухкомпонентной преобразующей оптической системы [8]:

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 = \frac{\left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2}{\frac{\Delta^2 (z_{k1}^2 + z_{p1}^2)}{f_1'^4} + \frac{2\Delta \cdot z_{p1}}{f_1'^2} + 1}, \quad (16)$$

или вводя полином $P(\Delta)$, выражение (16) можно записать в виде:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2}{P(\Delta)}, \quad (17)$$

$$\text{где } P(\Delta) = \frac{\Delta^2 (z_{k1}^2 + z_{p1}^2)}{f_1'^4} + \frac{2\Delta \cdot z_{p1}}{f_1'^2} + 1.$$

Расстояние между задним фокусом второго компонента и положением выходной перетяжки определяется соотношением [8]:

$$z'_{p2} = \alpha \cdot \left(z_{p1} + \frac{\Delta}{\alpha_1} \right) = \alpha \cdot \left(z_{p1} + \Delta \cdot \frac{z_{k1}^2 + z_{p1}^2}{f_1'^2} \right). \quad (18)$$

Тогда, из геометрических соображений можно вычислить (см. рис. 5):

$$\begin{aligned} d_2 &= f'_1 + f'_2 + \Delta, \\ d_3 &= f'_2 + z'_{p2}, \\ L &= 2 \cdot (f'_1 + f'_2) + \Delta - z_{p1} + z'_{p2}. \end{aligned} \quad (19)$$

где L - длина системы – расстояние от входной до выходной перетяжки.

Световые диаметры первого и второго компонентов определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} D_{св.1} &= 2 \cdot k_d \cdot h_{p1} \cdot \sqrt{1 + \frac{d_1^2}{z_{k1}^2}}, \\ D_{св.2} &= 2 \cdot k_d \cdot h_{p1} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{1 + \frac{d_3^2}{z_{k2}^2}}, \end{aligned} \quad (20)$$

а диафрагменное число каждого из них выражением:

$$N_{di} = \frac{|f'_i|}{D_{св.i}}. \quad (21)$$

Исходными данными для расчета параметров двухкомпонентной лазерной оптической системы являются:

- размер входной и выходной перетяжки h_{p1} и h'_{p2} ;
- параметр качества пучка M^2 ;
- рабочая длина волны излучения волоконного лазера λ ;
- диапазон значений положения входной перетяжки относительно ОС (расстояние d_1 на рис. 5);
- диапазон значений фокусных расстояний компонентов системы f'_1 и f'_2 .

В ходе расчетов параметров двухкомпонентных лазерных оптических систем рассматривали только схемы «положительный + положительный» компоненты и «отрицательный + положительный» компоненты. Две других возможных схемы заведомо не смогут обеспечить выполнение требуемых условий работы.

В качестве оценочной функции для двухкомпонентной лазерной оптической системы используется выражение:

$$F_z = P_1 \frac{L_i}{M_1} + P_2 \frac{I_i}{M_2}, \quad (22)$$

где $M_1 = \max[L_i]$, $M_2 = \max[I_i]$, а P_1 и P_2 - весовые коэффициенты, равные 0,3 и 0,7 соответственно.

В таблице 3 представлены результаты расчетов, полученные по формулам (16) – (21).

Таблица 3

Конструктивные параметры двухкомпонентной лазерной оптической системы

$h_{p1} = 0,025 \text{ мм}, h'_{p2} = 0,025 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 1$									
№	$d_1, \text{ мм}$	$d_2, \text{ мм}$	$d_3, \text{ мм}$	$f'_1, \text{ мм}$	$f'_2, \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{св.1}, \text{ мм}$	$D_{св.2}, \text{ мм}$	F_z
1	95	53,32	102,27	110	90	250,59	37,87	40,77	0,282
2	110	53,32	121,42	120	100	284,75	43,85	48,71	0,284
3	105	59,99	112,49	140	100	277,49	41,86	44,85	0,286
4	105	50,76	124,41	170	90	280,18	41,86	49,60	0,288
5	100	54,99	115,71	140	90	270,71	39,87	46,13	0,290

$h_p = 0,05 \text{ мм}, h'_p = 0,05 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 1$									
№	$d_1, \text{ мм}$	$d_2, \text{ мм}$	$d_3, \text{ мм}$	$f'_1, \text{ мм}$	$f'_2, \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{сб.1}, \text{ мм}$	$D_{сб.2}, \text{ мм}$	F_z
1	150	54,89	156,45	170	140	361,34	29,90	31,19	0,403
2	140	73,27	152,92	170	130	366,19	27,90	30,48	0,426
3	125	53,28	139,10	170	110	317,38	24,91	27,73	0,428
4	145	86,56	153,11	160	140	384,67	28,90	30,52	0,429
5	130	66,60	142,48	160	120	339,09	25,91	28,40	0,429
$h_p = 0,05 \text{ мм}, h'_p = 0,075 \text{ мм}, M^2 = 5,85, \lambda = 1,07 \text{ мкм}, \alpha = 2,25$									
№	$d_1, \text{ мм}$	$d_2, \text{ мм}$	$d_3, \text{ мм}$	$f'_1, \text{ мм}$	$f'_2, \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	$D_{сб.1}, \text{ мм}$	$D_{сб.2}, \text{ мм}$	F_z
1	125	60,90	197,27	140	170	383,17	24,92	26,22	0,477
2	125	55,48	209,51	170	150	389,99	24,92	27,84	0,482
3	120	66,52	194,23	140	160	380,76	23,92	25,81	0,491
4	120	83,08	189,56	130	170	392,64	23,92	25,19	0,500
5	115	65,89	190,13	140	150	371,02	22,92	25,27	0,502

Заключение

На основе изучения характеристик пучка волоконных лазеров разработана методика расчета конструктивных параметров одно- и двухкомпонентной лазерной оптической системы. Результаты проведённых расчётов показали, что для формирования пучка излучения мощного волоконного лазера наиболее целесообразно использовать двухкомпонентную лазерную оптическую систему. Использование двухкомпонентной системы позволяет значительно упростить структуру компонентов, входящих в преобразующую оптическую систему.

Список литературы

1. Kratky A., Schuöcker D., Liedl G. Processing with kW Fiber Lasers – Advantages and Limits // XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers edited by Rui Vilar, Olinda Conde, Marja Fajardo, Luis O. Silva, Margarida Pires, Andrei Utkin: proc. Of SPIE Vol. 7131, 71311X. Austria, Vienna: Vienna University of Technology, 2009. P. 1–4.
2. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное исследование лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали с использованием волоконного и CO_2 -лазеров при условии минимума шероховатости // Квантовая электроника. Вып. № 10 (2014). С. 970 – 974.
3. Dahv A.V. Kliner, Kwang Chong, Justin Franke and others. 4-kW Fiber Laser for Metal Cutting and Welding // Fiber Lasers VIII: Technology, Systems and Applications, edited by Jay W. Dawson, Eric C. Honea: proc. of SPIE Vol. 7914, 791418, SPIE. JDSU 430 N. McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035, USA, 2011. P. 1–7
4. Климков Ю. М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
5. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествин В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. 455 с.
6. Курков А. С., Дианов Е. М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. // Квантовая электроника, выпуск №10 (2004). С. 883–885.
7. Ширанков А.Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г. Разработка оптических головок технологических установок с мощными волоконными лазерами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. Спец. выпуск № 8 «Современные проблемы оптотехники». 2012. С. 53–56
8. Пахомов И.П., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986. 152 с.