

А.Ф. Ширанков, П.А. Носов, А.Г. Григорьянц,  
Р.С. Третьяков

## РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ГОЛОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С МОЩНЫМИ ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ

*Разработаны основы методики проектирования оптических лазерных головок для технологических установок с мощными волоконными лазерами. Методика учитывает свойства мощного многомодового излучения и позволяет проектировать наиболее простые по составу лазерные головки с широким набором технологических операций, выполняемых установкой.*

**E-mail:** ashirankov@bmstu.ru

**Ключевые слова:** методика проектирования, лазерно-оптическая система, схемотехника компонентов, искажения лазерного пучка.

Лазерно-оптические системы (ЛОС), предназначенные для преобразования лазерных пучков, широко используются в промышленности, а также в науке, технике и быту. Помимо высокого качества преобразования лазерного пучка, высокой функциональности, технологичности и дешевизны изготовления к ЛОС предъявляются требования удобства использования в работе. Разработка современных ЛОС осуществляется на основе научно обоснованной теории.

Теория преобразования лазерных пучков оптическими системами [1—3] — теория ЛОС — базируется на более общих законах, по сравнению с законами традиционной гауссовой оптики, применяемыми при работе с некогерентными (тепловыми, люминесцентными и др.) источниками (принцип Гаусса, закон Ньютона). Это обусловлено наличием ближней зоны лазерного пучка, размер которой определяется конфокальным параметром  $z_k$ . Следует отметить, что эти законы принципиально отличаются уже в параксиальной области. Поэтому общеизвестные программные средства Zemax, Code V, Oslo, Synopsys и др. не могут использоваться для разработки ЛОС даже на стадии выбора ее структурной схемы или габаритного расчета.

Работоспособность и эффективность теории ЛОС подтверждена на практике при работе с одномодовыми лазерами [4—6].

Весьма важной задачей при проектировании ЛОС является обеспечение малых искажений преобразуемого лазерного пучка по сравнению с идеальным преобразованием исходного лазерного пучка. Искажения лазерного пучка описываются системой параметров [7], где определяющее значение имеет обобщенный параметр качества

$M^2$  лазерного пучка. Параметр  $M^2$  применяется и для многомодовых пучков, в этом случае его более правильно называть параметром модового состава и качества лазерного пучка.

В настоящее время в лазерных технологических установках для выполнения большого числа задач по обработке материала используются мощные волоконные лазеры. При разработке ЛОС необходимо учитывать особенности лазерных пучков этих лазеров: многомодовое излучение за счет сложного характера взаимодействия различных мод внутри транспортировочного волокна, высокую мощность излучения (единицы и десятки киловатт), а также поглощение и отражение излучения в оптической системе лазерной головки (ЛГ). Кроме того, не редки случаи, когда отраженное от поверхностей оптической системы излучение попадает обратно во входной торец волоконного жгута и нарушает нормальную работу волоконного лазера. Поэтому при проектировании ЛГ необходимо рассчитать значение отраженного от поверхностей оптической системы излучения. Следовательно, при разработке ЛГ мощных волоконных лазеров прежде всего необходимо определить пространственное распределение плотности мощности многомодового лазерного пучка на выходе волокна и выяснить применимость теории лазерной оптики для описания распространения такого пучка в свободном пространстве. Кроме того, необходимо определить правомерность использования законов преобразования лазерного пучка через оптическую систему для такого излучения волоконного лазера.

Для решения этих вопросов была разработана методика измерения пространственного распределения пучка мощного волоконного лазера на разных участках оптической головки. При проведении экспериментов использовали оборудование лаборатории ООО «Московский центр лазерных технологий». Объектом исследования являлось лазерное излучение многомодового иттербиевого волоконного лазера ЛС-4-К с длиной волны излучения  $\lambda = 1,07$  мкм. Измерялось пространственное распределение плотности мощности излучения вдоль оси пучка на выходе из транспортирующего волокна и после его прохождения через оптические элементы ЛГ.

В лазере предусмотрен оптический каплер для замены одного транспортирующего волокна на другое с разными диаметрами внутренней жилы: 50 и 100 мкм.

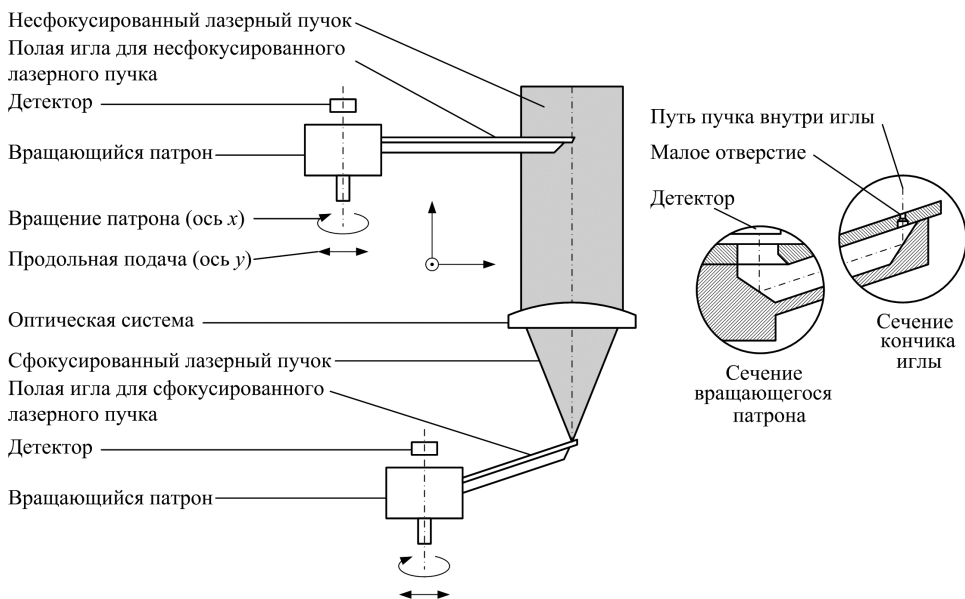
В качестве оптических элементов использовали следующие системы с просветлением на 1064 нм:

– коллимирующий узел фирмы Precitec COL CO 30C F125 (фокусное расстояние  $f' = 125$  мм) с двухлинзовым объективом;

- фокусирующие узлы фирмы Precitec YK52 ( $f' = 120$  мм) с двухлинзовым объективом, YC50 ( $f' = 200$  мм) и YW50 ( $f' = 300$  мм) с однолинзовыми объективами;
- фокусирующие линзы ( $f' = 150$  мм,  $f' = 300$  мм) производства ФГУП НПО «Астрофизика»;
- защитные пластины толщиной 2 мм фирмы Precitec и производства ФГУП НПО «Астрофизика».

Для перемещения лазерного пучка по высоте использовался промышленный робот ABB IRB2400 с установленной видеосистемой для контроля за процессом наведения лазерного пучка на обрабатываемый материал.

Измерения проводили с помощью диагностической системы LASERSCOPE UFF 100 для высокомоощных лазеров, обеспечивающей качественные измерения как расфокусированного, так и сфокусированного лазерного пучка. Схема диагностической системы для измерения лазерного излучения приведена на рис. 1. Через отверстие на конце иглы, обращенное к пучку, излучение после отражения от двух наклонных зеркал попадает на детектор. Измеряемый лазерный пучок сканируется по оси  $x$  за счет вращения иглы. Ось вращения  $y$  постоянно смещается, что позволяет сканировать все поперечное сечение пучка. Плотность мощности лазерного пучка измеряется путем регистрации яркости по каждому сечению пучка. Прибор позволяет делать до 41 смещения при измерении плотности мощности. Детектор наклонных зеркал усиливает сигнал, оцифровывает и временно



**Рис. 1. Схема диагностической системы LASERSCOPE UFF 100**

хранит его до передачи через последовательный интерфейс (RS 232) на компьютер для дальнейшей обработки.

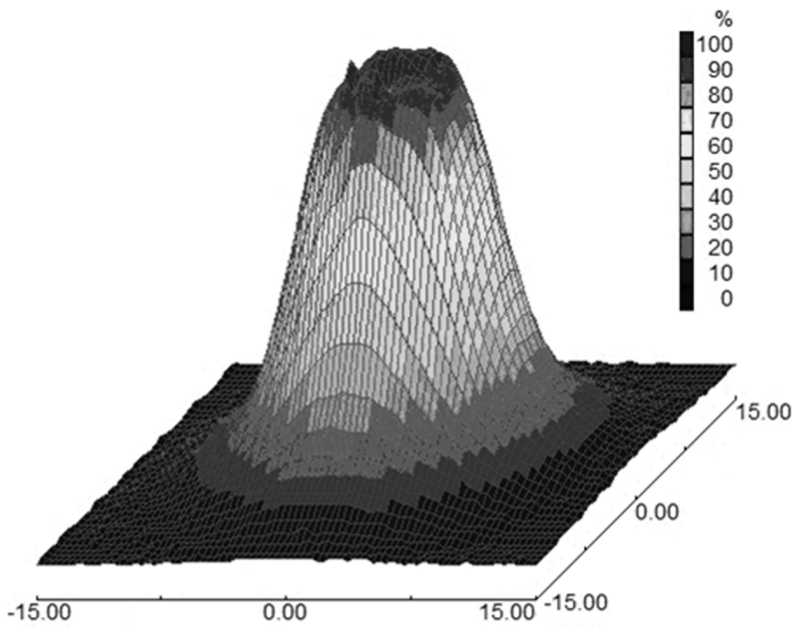
Диагностическая система LASERSCOPE UFF 100 может быть адаптирована для измерения лазерного излучения разной плотности мощности в широком спектральном диапазоне. Грубая настройка чувствительности осуществляется посредством отбора игл с различными размерами отверстия. Для более точной настройки выбирают значения внутренних коэффициентов усиления детектора.

Среднее поглощение мощности лазерного луча прибором в процессе измерения составляет всего около 1 %. Если во время измерения плотность мощности лазерного излучения превышает пороговое значение, то она ограничивается до максимально допустимого уровня либо выдается ошибка.

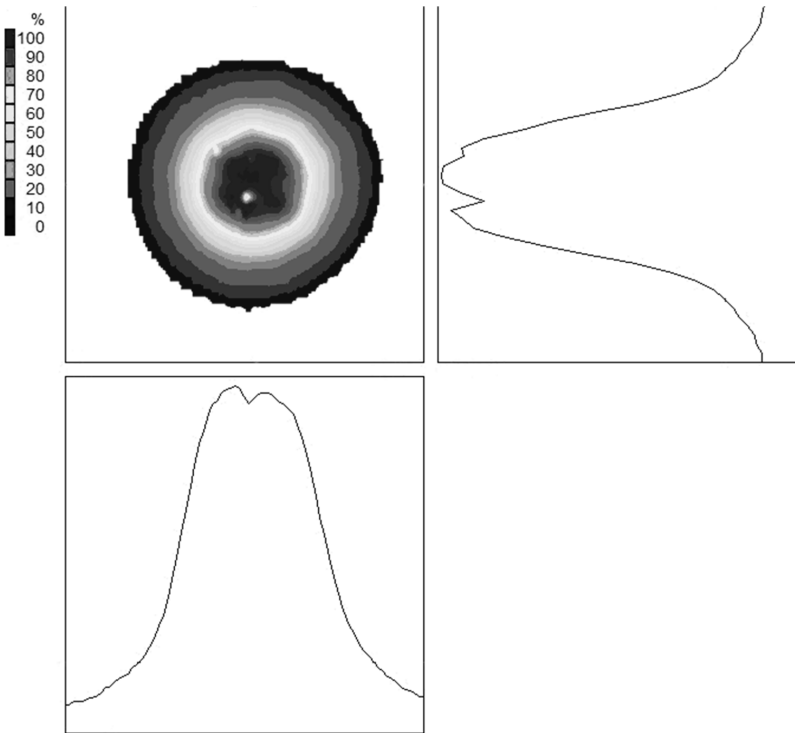
При исследованиях проводили измерения на выходе из транспортирующего волокна диаметром 50 мкм при средней мощности выходного пучка 1,5 кВт (рис. 2). Повторные измерения (10 раз) показали высокую абсолютную стабильность радиуса выходного пучка с колебанием менее 0,01 мм. В ходе измерений определяли пространственные распределения плотности мощности лазерного излучения на разных участках оптической системы ЛГ, по которым определяли диаметр огибающей лазерного пучка. При этом возможны два способа определения: как расстояние между точками поперечного сечения, где интенсивность составляет  $1/e^2$  от интенсивности на оси, и как размер зоны, где сосредоточена 0,86 часть  $(1 - 1/e^2)$  полного потока лазерного пучка. Поскольку в эксперименте эти критерии дали практически один и тот же результат, далее при определении огибающей использовали второй критерий, а диаметр огибающей пучка трактовали как диаметр пучка. При транспортирующем волокне диаметром 50 мкм в плоскости коллимирующего узла размер (1/2 диаметра) пучка по уровню 0,86 от полного потока составил 9,74 мм.

Затем исследовали пространственную структуру лазерного пучка после коллимирующего и фокусирующего узлов. В качестве коллиматора использовали систему Precitec COL CO 30C F125, состоящую из двух линз: двояковыпуклой и менисковой. Диаметр жилы выходного волокна 50 мкм. Средняя мощность лазерного излучения на выходе из волокна изменялась от 1 до 3,5 кВт.

Поскольку коллимирующий узел полностью открыт и находится без каких-либо систем защиты, во время проведения экспериментов коллимирующая оптика была повреждена. Наличие прогорания на внешней поверхности первой линзы подтвердилось при ее визуальном осмотре. Таким образом, все последующие измерения были проведены с данным дефектом в коллимирующей системе. При длительном включении и воздействии лазерного излучения «провал» в пятне



*a*



*б*

**Рис. 2. Результаты измерения распределения интенсивности пучка на выходе коллиматора:**

*a* — распределение интенсивности; *б* — вид сверху и поперечные сечения распределения интенсивности

увеличивался в диаметре из-за дифракции, возникающей в области дефекта. Кратковременное включение лазерного излучения не приводило к эффекту «расползания» пучка в диаметре. Следует отметить, что наличие этого дефекта влияет практически лишь на плотность мощности пучка в области его нахождения, но не влияет на расходимость и другие параметры пучка.

Размеры пучка на выходе коллиматора измерялись с шагом 15 мм на расстоянии 120 мм от исходного положения. Огибающая пучка на выходе коллиматора представлена на рис. 3, а. В начальном положении диаметр пучка составил 9,6 мм, в конечном — 8,58 мм.

На рис. 3 приведены результаты измерений размера пучка и аппроксимирующая их гиперболическая зависимость — огибающая пучка: на выходе из коллиматора (см. рис. 3, а) и на выходе фокусирующей линзы УС-50 при диаметре волокна 50 мкм (рис. 3, б) и фокусирующей линзы УК-52 при диаметре волокна 100 мкм (рис. 3, в). В результате обработки данных измерений были определены все параметры пучка на выходе фокусирующего узла:

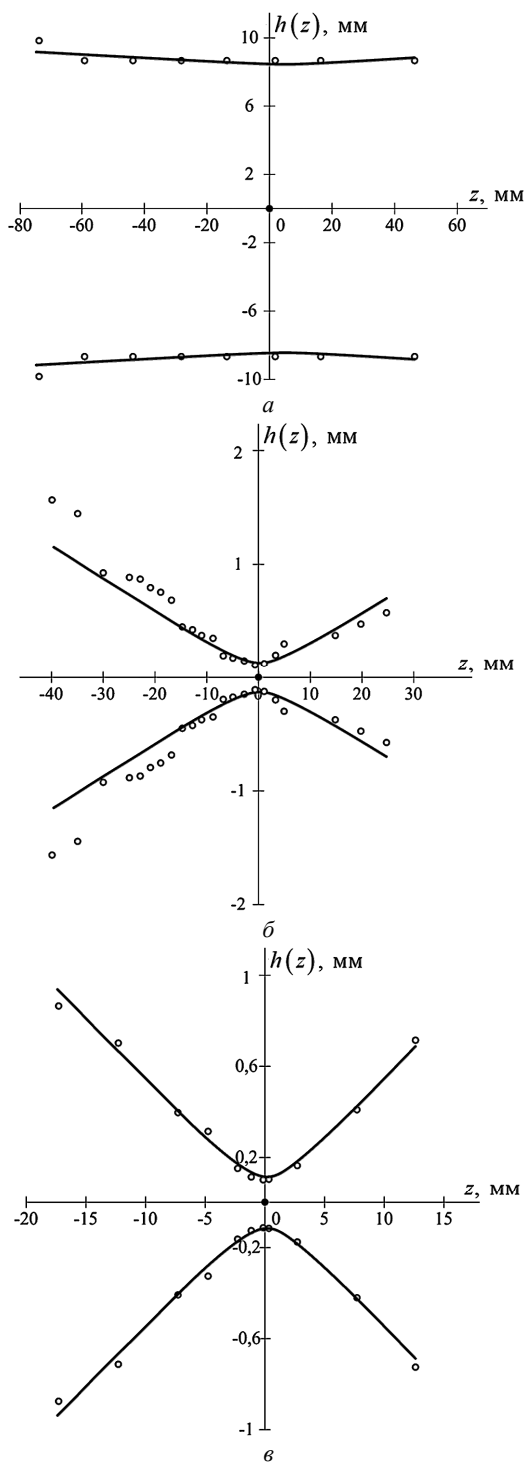
– для линзы УС-50 размер перетяжки  $h'_p = 0,100$  мм, угловая расходимость  $2\theta' = 0,053$  рад, параметр конфокальности  $z'_k = 3,75$  мм, параметр  $M^2 = 7,79$ ;

– для линзы УК-52  $h'_p = 0,104$  мм,  $2\theta' = 0,107$  рад,  $z'_k = 1,94$  мм,  $M^2 = 16,44$ .

Проведенные эксперименты показали, что для многомодового излучения мощного волоконного лазера справедливы законы распространения такого пучка в пространстве в соответствии с теорией ЛОС, а также закон его преобразования оптической системой. При этом излучение иттербиевого волоконного лазера можно адекватно описывать, используя коэффициент  $M^2$ , примененный к основной лазерной моде. Важно, что такой же вывод следует из работы [8] других авторов в этой же области.

Таким образом, для описания излучения волоконного лазера и его преобразования оптической системой можно использовать традиционные параметры лазерного пучка: полудиаметр перетяжки лазерного пучка по уровню  $1/e^2$  интенсивности  $h_p$ ; конфокальный параметр  $z_k$ ; положение перетяжки исходного пучка относительно переднего фокуса оптической системы  $z_p$ . Причем все основные связи и зависимости между параметрами лазерного пучка и понятие инварианта сохраняются, а параметр  $M^2$  обобщается на многомодовые пучки.

Ниже приведено описание разработки методики проектирования оптической системы высокоэффективной ЛГ для формирования излучения иттербиевого волоконного лазера ЛС-4-К в пятно малого размера для резки материала. Практика разработки и применения оптических ЛГ для считывания информации с цифровых оптических



**Рис. 3. Огибающая пучка по уровню 0,86 полного потока:**

*a* — на выходе коллиматора; *б*, *в* — на выходе фокусирующей линзы УС-50 и УК-52 соответственно

дисков [4—6] показала, что наилучшей структурной схемой является полученная экспериментально, а затем подтвержденная теоретически двухкомпонентная схема, у которой первым компонентом является коллимирующий узел, вторым — фокусирующий узел. Правильность выбора именно такой схемотехники для работы ЛГ в режиме резки не вызывает сомнений, так как условия функционирования оптики для этих двух задач одинаковы (за исключением мощности излучения). Структурная схема оптической системы разрабатываемой ЛГ приведена на рис. 4.

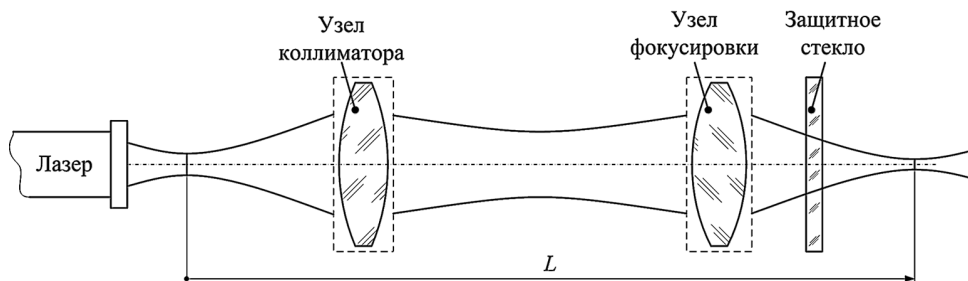


Рис. 4. Структурная схема оптической системы ЛГ

Постановка задачи для разработки оптической системы ЛГ: параметры лазерного пучка, выходящего из торца волоконного световода, известны:  $\lambda = 1,07$  мкм,  $M^2 = 13,2$ , а  $h_p$  определяется полудиаметром внутренней жилы волокна  $d_{\text{вол}}/2$ . Для лазера ЛС-4-К можно использовать оптоволокно диаметром 50...400 мкм.

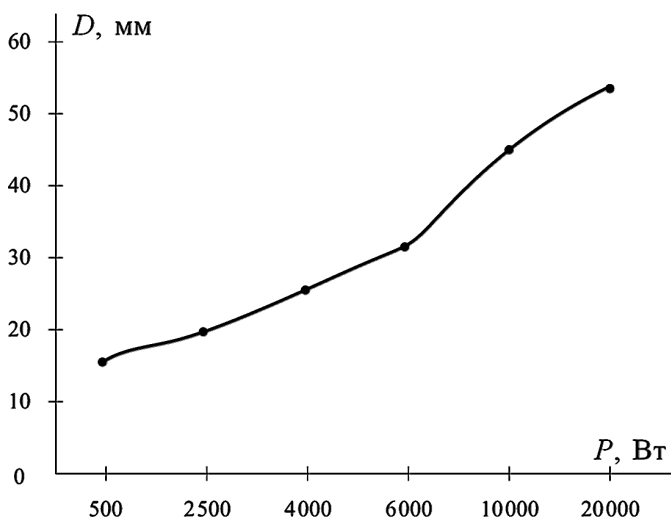
Необходимые требования к ЛГ: обеспечение требуемых параметров ( $h'_p, z'_k$ ) лазерного пучка в плоскости обработки; допустимые искажения лазерного пучка; состав компонентов; удельная лучевая нагрузка на оптические элементы.

При разработке необходимо определить следующие параметры: структуру узлов и форму линз оптической системы ЛГ; диапазон изменения угла падения ( $\varphi_{\text{max}}$ ) лучей на поверхность; искажения интенсивности поля лазерного пучка в плоскости обработки; отраженный обратно в лазер (от элементов ЛГ) поток излучения.

При разработке ЛГ учитывали следующие условия: малые искажения распределения интенсивности поля в плоскости обработки; коэффициент  $K_h$  эффективного увеличения диаметра пучка реальной выходной перетяжки; максимальный угол падения луча на поверхность линз; поток  $P_{\text{отр}}$  излучения обратного отражения от элементов ЛГ. При этом следует также учитывать реально достигнутую в настоящее время лучевую стойкость оптических элементов ЛГ (рис. 5).

Для решения поставленной задачи была разработана методика, обеспечивающая выбор наилучшей структурной схемы оптической





**Рис. 5.** Зависимость минимального диаметра  $D$  пучка лазерного луча на линзе от допустимой мощности  $P$  лазерного излучения, пропускаемого линзой (по данным фирмы Precitec)

системы ЛГ, расчет ее габаритных параметров и абберационный синтез компонентов (определение их конструктивных параметров) при выполнении всех необходимых условий и учете всех ограничений. На основании методики разработан алгоритм автоматического расчета оптической системы ЛГ для заданных параметров исходного пучка лазерного излучения и требуемых параметров выходного излучения.

Результаты расчета оптической системы ЛГ лазером ЛС-4-К с диаметром волокна 50 мкм приведены в табл. 1. Параметры исходного пучка:  $h_p = 0,025$  мм,  $z_k = 0,139$  мм; параметры идеального пучка, формируемого оптической системой ЛГ:  $h'_p = 0,134$  мм,  $z'_k = 4,0$  мм.

В табл. 1 использованы обозначения:  $K$  — номер компонента (1 — узел коллиматора, 2 — узел фокусатора);  $l$  — число линз в компоненте;  $f', D_{св}$  — заднее фокусное расстояние и световой диаметр компонента, мм;  $h'_p$  — размер реальной выходной перетяжки, мм;  $s'_p$  — положение выходной перетяжки относительно последней поверхности, мм;  $\varphi_{\max}$  — максимальный угол падения луча на поверхность линз, градус;  $dE$  — отклонение реального распределения плотности мощности в пятне фокусировки от идеального, %;  $W_{\max}$  — максимальная волновая абберация на выходе оптической схемы головки (в длинах волн);  $P_{отр}$  — мощность паразитного отраженного излучения, Вт;  $d_1$  — расстояние от торца волокна до коллиматора, мм;  $z_h$  — расстояние между коллиматором и фокусатором, мм;  $L$  — длина ЛГ от торца волокна до плоскости фокусировки, мм;  $d_{заг}$  — толщина заготовки для изготовления всех линз ЛГ, мм;  $K_{деф}$  — увеличение пятна фокусировки для ожидаемой продольной дефокусировки компонентов ЛГ.

Таблица 1

## Результаты синтеза ЛГ лазера ЛС-4-К с диаметром волокна 50 мкм

$K$	$l$	$f'$	$D_{\text{св}}$	$K_h$	$h'p$	$s'p$	$\varphi_{\text{max}}$	$dE_{\text{max}}$	$dE_{\text{min}}$	$W_{\text{max}}$	$P_{\text{орп}}$	$d_1$	$z_h$	$L$	$d_{\text{нар}}$	$K_{\text{неф}}$
1	1	45	29,5	7,06	0,958	-241	16,1	11,9	-12,2	6	0	31,7	0	0	9,9	0,1
2	2	125	32,7	2,36	0,316	136,9	28,8	2,1	-1,1	2,1	0,05	31,7	24,5	307,8	31,2	1,03
2	2	132,3	34,3	1,02	0,137	148,6	29,9	0	-2,6	0,19	0,05	31,7	42,8	337,1	31,7	1,03
2	2	139,7	36,2	1,03	0,139	164,5	29,8	0	-3,2	0,1	0,04	31,7	56,2	366,9	32	1,02
2	2	147	38	1,03	0,138	171,4	29,3	0	-3,1	0,12	0,04	31,7	78,7	396,6	32,2	1,02
2	2	154,4	39,4	1,04	0,14	189,6	29,1	0,2	-3,9	0,02	0,03	31,7	89,9	426,1	33,2	1,02
2	2	161,7	41,3	1,05	0,141	205,6	29	0,8	-4,4	0,01	0,03	31,7	103,1	456	33,5	1,02
2	2	169	42,8	1,05	0,141	217,7	27,2	1,5	-4,9	0,03	0,02	31,7	121,1	485,5	33,2	1,01
2	2	176,4	44,7	1,05	0,141	231	31,5	1,1	-4,8	0	0,02	31,7	135,8	515,5	37,1	1,01
2	2	183,7	46,3	1,06	0,142	240,1	29,5	1,2	-5,2	0,03	0,02	31,7	157	545	37,2	1,01
1	1	61,9	28,9	2,16	0,137	-96,3	13	0,1	-1,6	1,9	0	30,4	0	0	9,5	0,1
2	2	83,7	36,9	1,01	0,135	161,5	26,2	0,7	-2,1	0,4	0,04	30,4	22,8	328,9	32,2	1,03
2	2	88,1	38,9	1	0,134	175	26,2	0,5	-2,1	0,3	0,03	30,4	29,2	349	32,8	1,03
2	2	96,9	42,7	1	0,134	201,7	26,1	0,3	-2	0,27	0,02	30,4	42,2	389,4	34,1	1,03
2	2	105,7	46,9	1	0,134	229,9	38,7	0,4	-1,7	0,3	0,02	30,4	51,7	430,4	42,7	1,02
2	2	110,2	48,5	1,01	0,135	243,8	25,9	0	-2	0,27	0,02	30,4	59,7	450	34,5	1,02
1	1	78,8	27,8	1,19	0,057	-69,3	11	0	-0,3	0,65	0	28,7	0	0	9,7	0,1
2	2	75,3	41	1,01	0,136	190,4	30,3	0,6	-4	0,36	0,03	28,7	25	359,9	33,9	1,03
2	2	86,1	46,7	1	0,134	227,1	29,3	1,1	-3,4	0,53	0,02	28,7	42,7	415,1	38,3	1,03
1	1	95,6	25,8	1,01	0,042	-55,3	9,7	0	0	0,18	0,01	25	0	0	10,7	0,1
2	2	67,2	41	1,07	0,144	187,5	32,1	2,3	-5,2	1,11	0,04	25	27,2	356,5	39,9	1,03
2	2	70,4	42,8	1	0,134	200,3	34,3	1,7	-5,4	0,81	0,03	25	31,2	374,3	43,1	1,03
1	1	112,5	25,5	1	0,038	-49,7	7,8	0,2	0	0,02	0,01	25,6	0	0	9,5	0,1
2	2	65,5	43,1	1	0,134	203,2	35,1	2	-8	1,03	0,03	25,6	26,1	371,3	36,4	1,03
2	2	68,4	45,3	1,02	0,137	216,8	39,9	2,4	-7,7	1,13	0,03	25,6	28,9	388,8	39,9	1,03
2	2	71,4	47,5	1	0,135	231	42,6	2,2	-6,5	1,08	0,03	25,6	31,6	406,4	42,2	1,03
1	1	129,4	24,9	1	0,035	-45,4	6,3	0,3	0	0,01	0,01	25,2	0	0	9	0,1
2	2	62,2	43,1	1,14	0,153	201,9	37,3	3,3	-10,9	1,49	0,03	25,2	26,6	369,3	37,5	1,04

## Результаты синтеза ЛГ лазера ЛС-4-К с диаметром волокна 100 мкм

$K$	$l$	$f'$	$D_{об}$	$K_h$	$h'p$	$s'_p$	$\varphi_{max}$	$dE_{max}$	$dE_{min}$	$W_{max}$	$P_{orp}$	$d_1$	$z_h$	$L$	$d_{сар}$	$K_{деф}$
1	1	95,6	29,9	1,19	0,29	-366	7,6	0,2	-2,1	0,66	0	71,6	0	0	6,4	0,1
2	2	148,2	33,7	1	0,134	132,8	16,4	0	-0,2	0,02	0,06	71,6	46,9	361	22,7	1,01
1	1	112,5	29,7	1,06	0,164	-232	7,2	0	-0,8	0,38	0	71	0	0	6,4	0,1
2	2	123	33,5	1	0,134	134,4	16,3	0	-0,2	0,02	0,06	71	28,5	343	23,1	1,01
1	1	129,4	29,7	1,02	0,124	-182	6,2	0	-0,3	0,22	0	70,8	0	0	6,3	0,1
2	2	115,7	35,5	1	0,134	146,6	17	0,2	-0,2	0,04	0,05	70,8	35	362,4	23,9	1,01
2	2	141,4	43,7	0,99	0,133	199,6	36	0,7	0	0,02	0,03	70,8	81,9	466,6	39	1,01
1	1	146,2	29,5	1,01	0,105	-156	5,9	0	-0,2	0,13	0,47	70,3	0	0	6,3	0,1
2	2	106,5	35,5	1	0,134	149,2	17,7	0	-0,3	0,04	0,51	70,3	28	357,3	24,2	1,01
1	1	163,1	29,4	1	0,094	-140	5,4	0	-0,1	0,08	0,02	69,9	0	0	6,2	0,1
2	2	100,2	35,5	1	0,134	149,5	20,1	0	-0,5	0,05	0,07	69,9	24,3	354,3	25,4	1,01
1	1	180	29,2	1	0,086	-128	5,1	0	0	0,05	0,02	69,5	0	0	6,2	0,1
2	2	95,6	35,6	1	0,134	150	19,9	0	-0,6	0,07	0,06	69,5	22,4	352,1	25	1,01
1	1	102	31,9	1,22	0,296	-391	7,6	0,2	-2,1	0,71	0	76,4	0	0	6,8	0,1
2	2	156,9	35,6	1	0,134	148,9	33,9	0,1	-0,1	0,02	0,05	76,4	40,5	381,3	34,9	1,01
1	1	120	31,7	1,07	0,165	-247	7,2	0	-0,8	0,4	0	75,7	0	0	6,8	0,1
2	2	130,2	35,5	1	0,134	147,7	16,3	0	-0,2	0,02	0,05	75,7	28,4	362	24,4	1,01
1	1	138	31,6	1,03	0,124	-194	6,2	0	-0,3	0,24	0	75,5	0	0	6,7	0,1
2	2	122,1	37,4	1	0,134	160,3	34,8	0,2	0	0,02	0,04	75,5	31,6	382,5	36	1,01

$K$	$l$	$f'$	$D_{\text{св}}$	$K_h$	$hp$	$s'_p$	$\varphi_{\text{max}}$	$dE_{\text{max}}$	$dE_{\text{min}}$	$W_{\text{max}}$	$P_{\text{орп}}$	$d_1$	$z_h$	$L$	$d_{\text{заг}}$	$K_{\text{деф}}$
1	1	156	31,5	1,01	0,105	-166	5,9	0	-0,2	0,14	0,41	75	0	0	6,7	0,1
2	2	112,4	37,4	1	0,134	162,5	17,7	0	-0,3	0,04	0,45	75	27,8	376,2	25,5	1,01
1	1	174	31,3	1	0,094	-149	5,4	0	-0,1	0,08	0,02	74,6	0	0	6,6	0,1
2	2	105,8	37,4	1	0,134	161,5	18,9	0,1	-0,4	0,06	0,06	74,6	26	373	25,9	1,01
1	1	192	31,1	1	0,086	-137	5,1	0	0	0,05	0,02	74,1	0	0	6,6	0,1
2	2	100,9	37,5	1	0,134	162,7	20,9	0	-0,6	0,06	0,05	74,1	22,6	371,1	27	1,01
1	1	70,1	33,8	2,88	0,678	378,8	11	9,1	0	3,02	0	81,7	0	0	8,8	0,1
2	2	514,9	28,3	1,26	0,169	94	23,1	0,4	-0,4	0,78	50	81,7	55,9	340	22,3	1,01
1	1	89,2	33,9	1,91	2,393		9,1	47	-18,3	1,41	0	81,4	0	0	7,9	0,1
2	2	222	35,3	1,01	0,136	149,4	19,2	0	-1,4	0,01	0,05	81,4	130,1	472,5	26,1	1
1	1	108,4	33,9	1,24	0,301	-415	7,6	0,2	-2,1	0,75	0	81,2	0	0	7,3	0,1
2	2	165,6	37,5	1	0,135	163,5	16,6	0	-0,4	0,02	0,04	81,2	42,4	398,8	25,5	1,01
1	1	127,5	33,7	1,08	0,167	-263	7,2	0	-0,8	0,43	0	80,4	0	0	7,3	0,1
2	2	137,5	37,5	1	0,134	161	16,3	0	-0,2	0,02	0,04	80,4	28,3	380,9	25,7	1,01
1	1	146,6	33,6	1,03	0,125	-206	6,2	0	-0,3	0,25	0	80,2	0	0	7,1	0,1
2	2	128,5	39,3	1	0,134	174,4	17,1	0,1	-0,2	0,03	0,04	80,2	33,6	400,2	26,5	1,01
1	1	165,8	33,4	1,01	0,105	-177	5,9	0	-0,2	0,15	0,36	79,7	0	0	7,1	0,1
2	2	118,3	39,4	1	0,134	175,9	17,7	0	-0,3	0,03	0,39	79,7	27,7	395,1	26,8	1,01
1	1	184,9	33,3	1	0,094	-158	5,4	0	-0,1	0,09	0,02	79,3	0	0	7,1	0,1
2	2	111,4	39,5	1	0,134	176,1	18,9	0	-0,4	0,05	0,05	79,3	24,3	392	27,3	1,01
1	1	204	33,1	1	0,087	-145	5,1	0	0	0,05	0,01	78,8	0	0	7	0,1
2	2	132,8	49,2	1	0,134	242,2	19,9	0,2	-0,6	0,07	0,03	78,8	67,1	501,7	30,4	1,01

Результаты расчета оптической системы ЛГ лазера ЛС-4-К с диаметром волокна 100 мкм ( $h_p = 0,05$  мм,  $z_k = 0,556$  мм) приведены в табл. 2. Параметры идеального пучка, формируемого оптической системой ЛГ:  $h'_p = 0,134$  мм,  $z'_k = 4,0$  мм.

Из сравнения данных табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что использование волокна диаметром не менее 100 мкм обеспечивает более эффективную структуру оптической системы, а ее стоимость снижается.

В результате проведенных исследований с учетом принятых критериев селекции неподходящих решений установлены следующие соотношения числа линз оптической системы ЛГ в коллиматоре и фокусаторе для волоконного лазера:

Размер входной перетяжки $2h_p$ , мкм .....	50	100—200	200—400	>400
Число линз в коллиматоре .....	1...2	1	2	1
Число линз в фокусаторе.....	2	1...2	1	1

Отметим, что определенная теоретически структура ЛГ полностью совпадает со схмотехникой ЛГ фирмы Precitec (Германия), кроме случая, когда диаметр волокна равен 50 мкм (см. рис. 5). Однако более рациональное построение линз позволит не только увеличить эффективность разработанной ЛГ с мощными волоконными лазерами, но и расширит номенклатуру технологических операций на данной установке.

**Заключение.** Разработаны методики основы проектирования оптической системы ЛГ минимальным числом наиболее простых линз. При максимальной функциональности ЛГ обеспечивается минимальная стоимость ее изготовления и эксплуатации. Применение данной методики при проектировании конструкции оптической системы ЛГ для резки материалов позволяет:

- обеспечить в рабочей зоне требуемые параметры лазерного пучка ( $h'_p, z'_k$ );
- использовать оптическую систему с минимально возможным числом линз с наименее крутыми радиусами кривизны;
- исключить из рассмотрения варианты оптической схемы с недопустимо большим уровнем потока обратного отражения или с большими углами падения лучей на поверхности линз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествин В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы: учеб. пособие для вузов / под ред. И.И. Пахомова. – М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
2. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986. – 152 с.

3. Аберрационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков / П.А. Носов, В.Ю. Павлов, И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78. – № 9. – С. 34–44.
4. Shirankov A. F. et al. DVD System Software Simulaor ISOM/ODS // Joint International Sysposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2002, Hawaii. 7–11 Jule 2002. WP10.
5. Пат. РФ RU2227313. Высокоразрешающая ОС одномерного квазилинейного сканирования лазерным пучком. 20.04.2004.
6. Ширанков А. Ф., Рожков О. В. Оптика лазерной осветительной системы проекционного телевизора с матрицей микрозеркал: сб. трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика». – СПб, 2004. – Т. 1 (2). – С. 433–436.
7. Носов П. А. Методы анализа и синтеза оптических систем для высококачественного преобразования лазерных пучков: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 150 с.
8. Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологии / В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин, В.Д. Дубров и др. // Лазеры в науке, технике, медицине: сб. научн. тр. XXII Международной научно-технической конференции. – М., 2001. – Т. 22. – С. 38–43.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012