

Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики

А.Ф. Ширанков¹, П.А. Носов¹, И.И. Пахомов¹, А.Г. Григорьянц¹,
В.П. Якунин², Р.С. Третьяков¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ИПЛИТ РАН, г. Шатура Московской области, 140700, Россия

Разработана методика синтеза оптических систем лазерных головок технологических установок с волоконными лазерами. Синтез и разработка рабочей конструкторской документации на изготовление оптических деталей лазерной головки проведены с учетом когерентных свойств мощного лазерного излучения и всех характерных особенностей функционирования подобного оборудования.

Ключевые слова: волоконный лазер, лазерная головка, лазерно-оптическая система, методика проектирования, схемотехника компонентов, искажения лазерного пучка.

Введение. В настоящее время новые лазеры широко применяются в различных отраслях: автомобилестроении, судостроении, авиационной промышленности и др. Для выполнения большого числа задач по обработке материала в лазерных технологических установках используются мощные волоконные лазеры. К преимуществам волоконных лазеров по сравнению с СО₂-лазерами, твердотельными и другими лазерами относятся (табл. 1): высокий КПД; удобная транспортировка излучения к обрабатываемому материалу; высокая стабильность выходных параметров; высокая надежность элементов волоконного лазера и большой ресурс работы; простота эксплуатации и отсутствие юстировочных элементов.

Для получения хороших результатов при обработке излучением волоконных лазеров необходимо уделять внимание как технологии обработки, так и характеристикам элементов установки. Применение оптимизированных оптических систем в технологических головках позволяет значительно поднять качество и производительность процесса обработки.

Обзор существующего лазерного оборудования в России и за рубежом показал недооценивание роли оптической системы в лазерном оборудовании. Повышение производительности и характеристик лазерных технологических установок часто сводится лишь к увеличению мощности лазера и применению различных кинематических схем.

Таблица 1

Сравнительные характеристики лазеров [1]

Параметр	Потребность в промышленности	СО ₂ -лазер	АИГ:Nd с ламповой накачкой	АИГ:Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
Длина волны излучения, мкм	Как можно меньше	10,6	1,064	1,064 или 1,03	0,8...0,98	1,07
Параметр <i>VPR</i> , мм·мрад	< 10	3...6	22	22	> 200	1,3...14
КПД, %	> 20	8...10	2...3	4...6	25...30	20...25
Дальность доставки излучения в локном	10...300	–	20...40	20...40	10...50	10...300
Стабильность выходной мощности	Как можно выше	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Очень высокая
Чувствительность к обратному отражению	Как можно ниже	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Занимаемая площадь, м ²	Как можно меньше	10...20	11	9	4	0,5
Стоимость монтажа, отн. ед.	То же	1	1	0,8	0,2	< 0,05
Стоимость эксплуатации, отн. ед.	»	0,5	1	0,6	0,2	0,13
Стоимость обслуживания, отн. ед.	»	1...1,5	1	4...12	4...10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, ч	Как можно больше	–	300...500	2000...5000	2000...5000	> 50 000

При увеличении мощности лазера помимо роста стоимости, ухудшается качество его излучения. В результате увеличивается энергопотребление источника излучения, уменьшается КПД лазерной установки и снижается качество обработки вследствие появления различного рода нежелательных дефектов. В то же время, например, за счет корректного расчета применяемых оптических элементов с учетом принципиального различия свойств когерентного лазерного излучения и некогерентного теплового излучения легко достигается уменьшение размера лазерного пятна в зоне обработки в 2...3 раза, что эквивалентно повышению мощности лазера более чем в 4...9 раз.

Появление и последующее бурное развитие лазерной техники способствовали становлению новых научных направлений. Так, одним из таких направлений является лазерная оптика — раздел оптики, в котором изучается формирование лазерного излучения оптическим резонатором и внешней оптической системой и вопросы синтеза, разработки и создания лазерных приборов, оборудования и технологических комплексов, обеспечивающих успешное решение различных практических задач. Это научное направление успешно развивается более 35 лет на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством д-ра техн. наук, профессора И.И. Пахомова.

Преобразование когерентного лазерного излучения оптическими системами описывается более общими законами, чем законы (такие как принципы Гаусса и формула Ньютона), которые используются в традиционной гауссовой оптике при работе с некогерентными (тепловыми, люминесцентными и др.) источниками [2–4]. Причем эти законы принципиально различаются уже в параксиальной области. Кроме того, различаются пространственные параметры, характеризующие когерентное лазерное и некогерентное тепловое излучения. Поэтому общеизвестные программные средства Zemax, Code V, Oslo, Synopsys и др. нельзя использовать при разработке оптических систем для лазерной обработки. Это особенно относится к выбору структурной схемы и габаритному расчету оптических систем.

При работе с одномодовыми лазерами теория лазерной оптики продемонстрировала работоспособность и эффективность на практике, что подтверждается успешной разработкой ряда лазерно-оптических систем [5–7].

В настоящей работе экспериментально доказана применимость теории лазерной оптики для описания распространения в свободном пространстве и преобразования оптической системой излучения мощного волоконного лазера. На основе теории лазерной оптики разработана методика синтеза оптических систем технологических головок для лазерной обработки материала.

Экспериментальное определение пространственных параметров пучка мощного иттербиевого волоконного лазера. Пучки мощных волоконных лазеров имеют следующие особенности [8]:

- наличие многомодового излучения обуславливает необходимость учитывать сложный характер взаимодействия различных мод излучения внутри волоконного транспортировочного световода;
- высокая мощность излучения (единицы и десятки киловатт в непрерывном режиме генерации).

Для разработки оптических систем мощных волоконных лазеров прежде всего необходимо знать пространственное распределение плотности мощности многомодового лазерного пучка на выходе волокна, пространственные параметры пучка и выяснить применимость теории лазерной оптики для описания распространения такого пучка в свободном пространстве и при преобразовании оптической системой.

Для решения этих задач разработана методика измерения пространственного распределения плотности мощности пучка мощного волоконного лазера на разных участках оптической системы лазерной головки. По полученным распределениям определяют диаметр лазерного пучка по двум критериям: методом моментов либо как размер зоны, в которой сосредоточено 86,5 % полного потока лазерного пучка. В проведенном эксперименте эти критерии дали практически один и тот же результат, поэтому в работе при определении диаметра пучка использован второй критерий.

Результаты измерений диаметра пучка в различных сечениях аппроксимировались зависимостью, описывающей изменение размера (полу диаметра) огибающей лазерного пучка вдоль оси z [3, 4],

$$h(z) = h_p \sqrt{1 + \left(\frac{z - s_p}{z_k} \right)^2} = \sqrt{h_p^2 + (z - s_p)^2} \theta^2. \quad (1)$$

Здесь h_p — размер перетяжки пучка; z_k — параметр конфокальности пучка, соответствующий расстоянию от перетяжки пучка, на котором размер пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз; 2θ — угловая расходимость пучка (полный угол); s_p — положение перетяжки пучка относительно выбранной реперной плоскости с координатой $z = s_p$, в которой размер пучка имеет минимальное значение h_p .

Для оценки качества лазерного пучка в настоящее время широко применяют параметр BPP (Beam Parameter Product), мм·мрад:

$$BPP = h_p \theta = \frac{h_p^2}{z_k} = \text{const} = M^2 \frac{\lambda}{\pi}.$$

В этом соотношении λ — длина волны лазерного излучения; M^2 — безразмерный параметр, определяющий для реального пучка и идеального гауссова пучка моды TEM_{00} различие произведений диаметра перетяжки и угловой расходимости. Поэтому иногда используют «критерии M^2 »; для идеального гауссова пучка $M^2 = 1$, а для реального пучка $M^2 > 1$.

При проведении эксперимента использовалось оборудование лаборатории ООО «Московский центр лазерных технологий». Объектом исследования являлось излучение на выходе многомодульного непрерывного иттербиевого волоконного лазера ЛС-4-К ($\lambda = 1,07$ мкм, $BPP = 2$ мм·мрад) с мощностью излучения 4,0 кВт [9]. Для лазера с диаметром волокна 50 мкм проводились измерения пространственного распределения плотности мощности излучения вдоль оси пучка после его прохождения через узлы оптической системы технологической головки фирмы Precitec (Германия):

- коллимирующий узел COL CO 30C F125 ($f' = 125$ мм, двухлинзовый объектив, просветляющее покрытие на 1 064 нм);
- фокусирующий узел UC50 ($f' = 200$ мм, однолинзовый объектив, просветляющее покрытие на 1 064 нм).

Измерения проводились с помощью диагностической системы для высокомошных лазеров PROMETEC LASERSCOPE UFF 100. Прибор позволяет проводить качественные измерения как расфокусированного, так и сфокусированного лазерных пучков. Рассмотрим принцип работы этого прибора (рис. 1). Через отверстие на конце иглы, обращенное к пучку, излучение после отражения от двух наклонных зеркал попадает на детектор. Точка анализа может сканировать измеряемый лазерный пучок по оси x за счет вращения иглы. Ось вращения y постоянно смещается, что позволяет сканировать по всей площади поперечного сечения пучка. Распределение плотности мощности лазерного пучка измеряется путем регистрации яркости по каждому сечению площади пучка. Прибор позволяет выполнять до 41 смещения с целью измерения плотности мощности. Детектор наклонных зеркал усиливает сигнал, оцифровывает его и временно хранит до передачи через последовательный интерфейс (RS 232) на компьютер для дальнейшей обработки.

Прибор PROMETEC LASERSCOPE UFF 100 может быть адаптирован для измерения лазерного излучения различных плотностей мощности в широком спектральном диапазоне. Грубую настройку чувствительности прибора можно провести через отбор игл с различными размерами отверстия. Более точная настройка осуществляется путем указания внутренних коэффициентов усиления детектора.

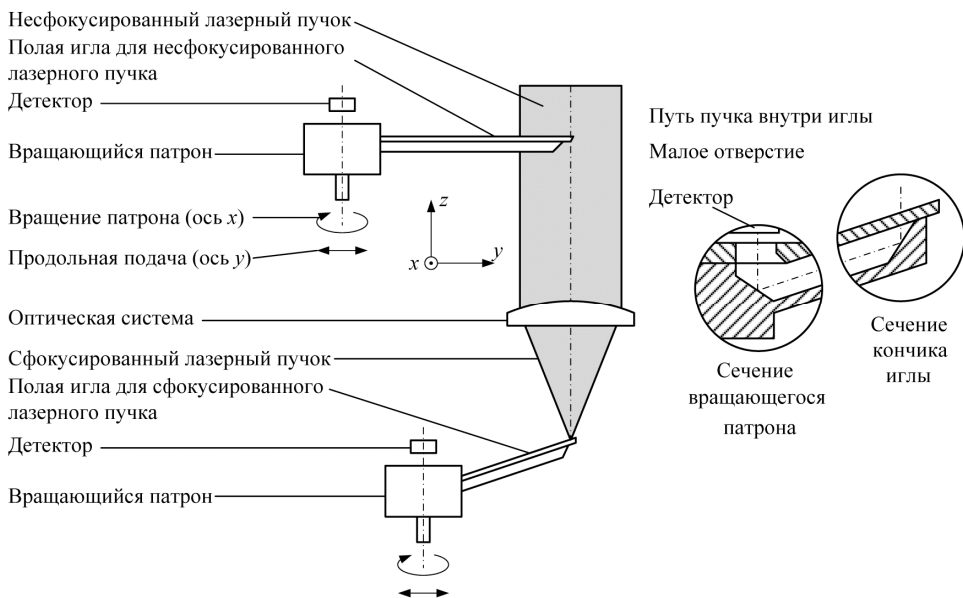


Рис. 1. Схема прибора PROMETEC LASERSCOPE UFF 100

Угловая расходимость и параметр конфокальности входного пучка рассчитаны соответственно по формулам:

$$2\theta = \frac{2BPP}{h_p}; \quad z_k = \frac{h_p^2}{BPP}, \quad (2)$$

где h_p — размер входной перетяжки, равный полудиаметру жилы волокна.

Для исследуемого волоконного лазера $h_p = 25$ мкм, $BPP = 2$ мм·мрад. По формулам (2) рассчитываем угловую расходимость и параметр конфокальности пучка: $2\theta = 0,16$ рад, $z_k = 0,31$ мм.

При транспортирующем волокне диаметром 50 мкм на коллиматоре определен размер пучка по уровню 86,5 % полного потока: $h_{кол} = 8,6$ мм. Используем это значение для определения положения торца волокна лазера (перетяжки входного пучка).

Поскольку параметр конфокальности пучка на выходе волокна мал ($z_k \ll 1$), из зависимости (1) получим: $h(z) = \frac{h_p}{z_k} |z - s_p| = \theta |z - s_p|$.

Расстояние s от торца волокна до первой поверхности коллиматора рассчитываем по формуле $s = h_{кол} / \theta$. С учетом приведенных данных $s = 107,5$ мм. Передний фокус коллиматора относительно первой поверхности находится на расстоянии $s_{F_{эКВ}} = -111,33$ мм, тогда рас-

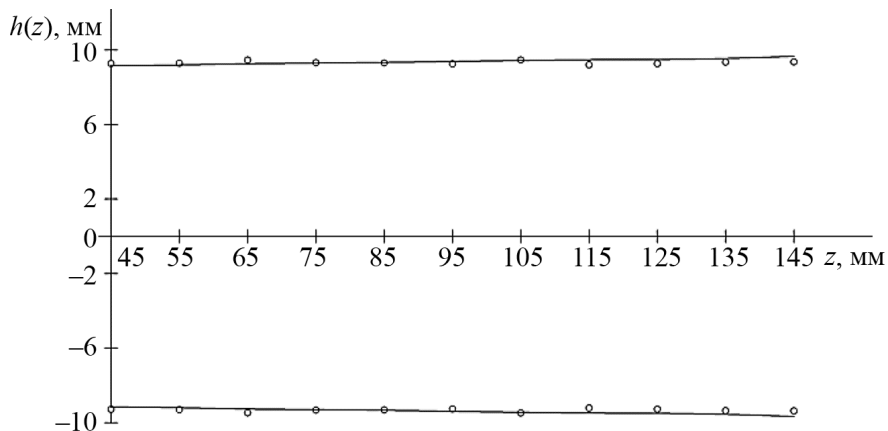
стояние от переднего фокуса коллиматора до торца волокна $z_{p0} = -s_{F_{\text{экв}}} - s = 3,83$ мм.

Также проведены исследования пространственной структуры лазерного пучка после коллиматора, состоящего из двух линз: менисковой и двояковыпуклой. Измерения проводились со всеми включенными модулями на нескольких мощностях излучения (600, 900, 1 200, 1 800 и 2 700 Вт) с шагом 10 мм на расстоянии 100 мм от начального положения. Максимально близкое расстояние, на которое удалось подвести измерительный прибор от последней поверхности коллиматора, составило 45 мм. При мощности лазерного излучения 2 700 Вт в начальном положении при проведении измерений размер пучка составил 9,28 мм, а в конечном — 9,36 мм. Также было зарегистрировано распределение плотности мощности излучения в задней фокальной плоскости коллиматора. Для мощности излучения 2 700 Вт размер пучка в этой плоскости $h_{F'} = 9,34$ мм. Это позволило рассчитать угловую расходимость входного пучка по данным измерений: $2\theta = 0,15$ рад. Видно, что значения угловой расходимости пучка волоконного лазера, определенные по паспортным данным на лазер и экспериментально, практически совпадают. На рис. 2, а представлены результаты измерений размера пучка на выходе коллиматора при мощности излучения 2 700 Вт и аппроксимирующая их гиперболическая зависимость.

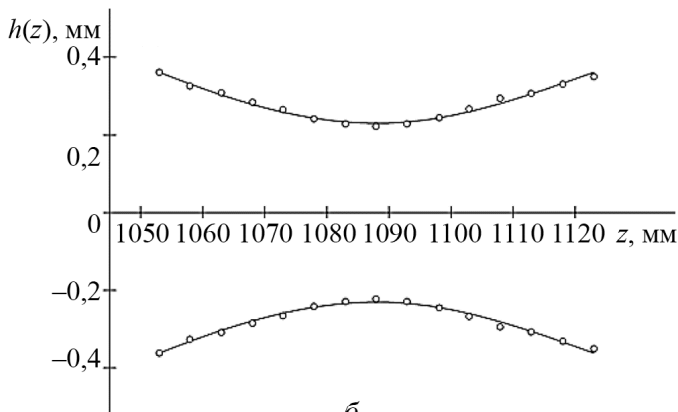
Для того чтобы проверить справедливость применения законов лазерной оптики при описании преобразования оптической системой пучка мощного волоконного лазера проведены измерения распределения плотности мощности излучения на выходе коллиматора, дефокусированного в продольном направлении на $z_{\text{см}} = 15,2$ мм. В этом случае торец волокна относительно переднего фокуса коллиматора находится на расстоянии $z_p = z_{p0} - z_{\text{см}} = -11,37$ мм. Смещение коллиматора позволило сформировать сходящийся пучок (рис. 2, б). Измерения проводились в окрестности перетяжки пучка на расстоянии 70 мм от начального положения со всеми включенными модулями лазера на нескольких мощностях излучения: 600, 900, 1 200, 1 800 и 2 700 Вт.

По результатам обработки измерений после дефокусированного коллиматора определены пространственные параметры преобразованного пучка. Для мощности лазерного излучения 2700 Вт (см. рис. 2, б) размер перетяжки пучка $h'_p = 0,23$ мм, перетяжки пучка относительно последней поверхности коллиматора находятся на расстоянии 1 088,0 мм, относительно заднего фокуса коллиматора — на расстоянии $z'_p = 963,30$ мм, угловая расходимость пучка

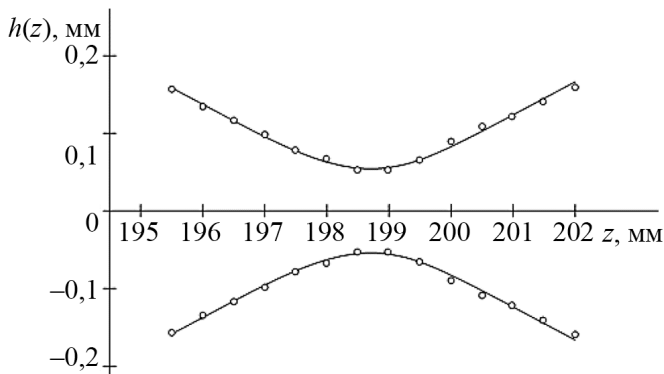
$2\theta' = 16$ мрад, параметр конфокальности пучка $z'_k = 28,69$ мм, параметр $M^2 = 5,38$, параметр $BPP = 1,83$ мм·мрад.



a



б



в

Рис. 2. Результаты измерений размера пучка внутри оптической системы лазерной головки и их аппроксимация:

a — на выходе коллиматора; *б* — на выходе дефокусированного коллиматора; *в* — на выходе фокусирующего узла

Продольное увеличение лазерно-оптической системы определяется соотношениями [3, 4]:

$$\alpha = \left(\frac{h'_p}{h_p} \right)^2 = \left(\frac{2\theta}{2\theta'} \right)^2 = \frac{z'_k}{z_k} = \frac{-z'_p}{z_p}. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае продольное увеличение дефокусированного коллиматора, рассчитанное по разным параметрам пучка, составляет $\alpha_{h_p} = 83,9$, $\alpha_{\theta} = 87,2$, $\alpha_{z_k} = 91,8$, $\alpha_{z_p} = 84,7$.

Для случая, когда включены все модули лазера, при мощности излучения 600 Вт проведены измерения после фокусирующего узла. На рис. 2, в приведены результаты этих измерений и аппроксимирующая их гиперболическая зависимость. В результате обработки данных измерений определены все пространственные параметры пучка на выходе фокусирующего узла: $h'_p = 0,054$ мм, перетяжка пучка относительно последней поверхности фокусирующего узла находится на расстоянии 198,68 мм, $2\theta' = 0,095$ рад, $z'_k = 1,13$ мм, $M^2 = 7,5$, $BPP = 2,57$ мм·мрад.

В ходе измерений также исследовано влияние защитного стекла на параметры выходного пучка. Полученные результаты позволяют сделать вывод о незначительном влиянии защитного стекла на пространственные параметры и качество формируемого в рабочей зоне лазерного пучка.

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1) многомодовое излучение мощного волоконного лазера подчиняется теории лазерной оптики: его распространение в свободном пространстве и преобразование оптической системой можно описывать пространственными параметрами лазерного пучка — размером перетяжки по уровню 86,5 % полного потока, конфокальным параметром, положением перетяжки, угловой расходимостью;

2) значение параметра пучка BPP волоконного лазера, определенное по результатам измерений, практически совпадает с его паспортным значением с погрешностью менее 10 %;

3) параметр пучка BPP на выходе фокусирующего узла немецкой оптической системы увеличивается в 1,3 раза;

4) для синтеза оптической системы возможно использование теории лазерной оптики.

Отметим, что эти выводы также следует из работы [10] других авторов в этой же области.

Особенности и критерии разработки оптических систем в рамках теории лазерной оптики. Поскольку оптическая система

технологической головки мощного волоконного лазера работает с интенсивными потоками излучения, она относится к классу силовой оптики. Задачи разработки и изготовления такой оптики имеют ряд особенностей:

- лучевая стойкость оптических элементов с учетом мощности излучения лазера (рис. 3) определяется материалом, качеством обработки рабочих поверхностей линз и лучевой стойкостью просветляющего покрытия;

- обеспечение малых абберационных и дифракционных искажений распределения интенсивности поля в зоне обработки;

- большая мощность излучения обратного отражения от оптических элементов. Это связано с тем, что волоконный лазер очень чувствителен к уровню мощности излучения обратного отражения (нередки случаи, когда отраженное от поверхностей оптической системы излучение нарушает нормальную работу волоконного лазера).

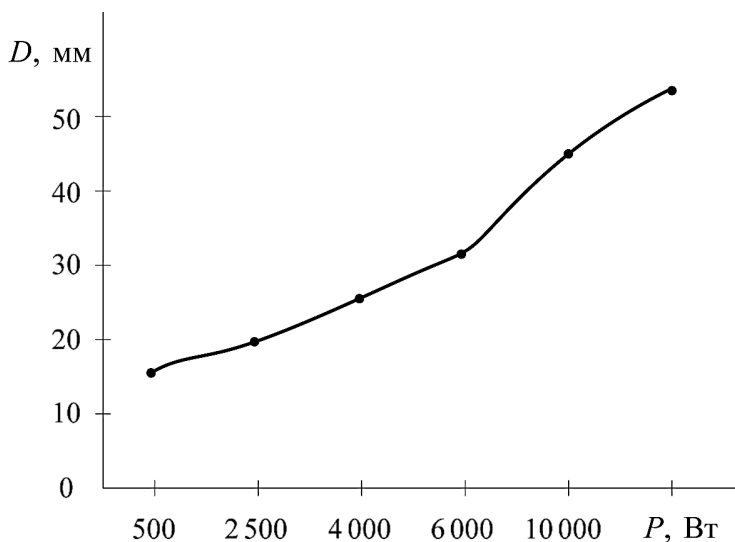


Рис. 3. Зависимость минимального диаметра D пучка на линзе от допустимой мощности P лазерного излучения, пропускаемого линзой (документация фирмы Precitec)

Практика разработки и применения лазерных оптических головок для считывания информации с цифровых оптических дисков [5-7] показывает, что оптимальная структурная схема оптической системы (определенная теоретически, а затем подтвержденная практически) — это двухкомпонентная схема. Первым компонентом схемы является коллимирующий узел, вторым — фокусирующий. Оптическая система для лазерной обработки имеет такую же структурную схему (рис. 4).

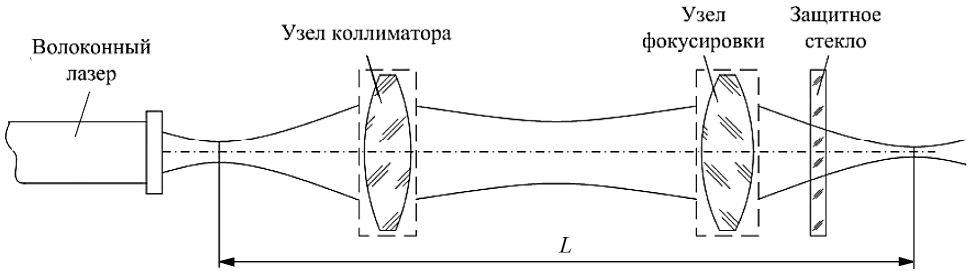


Рис. 4. Структурная схема оптической системы технологической головки

Для проведения габаритного синтеза лазерно-оптической системы технологической головки используем следующие соотношения [4]:

$$2h'_{p2} = 2h_{p1}\sqrt{\alpha}; \quad z'_{k2} = z_{k1}\alpha; \quad z'_{p2} = \left(z_{p1} + \Delta \frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right) \alpha;$$

$$L = 2(f_1' + f_2') - z_{p1}(1 - \alpha) + \Delta \left(1 + \alpha \frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right);$$

$$Nd_1 = \frac{f_1'}{D_{св1}} = \frac{f_1'}{2K_d h_{p1} \sqrt{1 + \left[(f_1' - z_{p1}) / z_{k1} \right]^2}};$$

$$Nd_2 = \frac{f_2'}{D_{св2}} = \frac{f_2'}{2K_d h'_{p2} \sqrt{1 + \left[(f_2' + z'_{p2}) / z'_{k2} \right]^2}},$$

где z_{k1} , z'_{k2} — параметры конфокальности пучка на входе и выходе; z_{p1} — положение перетяжки входного пучка относительно переднего фокуса F_1' первого компонента оптической системы (соответствует положению торца волокна); z'_{p2} — положение перетяжки выходного пучка относительно заднего фокуса F_2' второго компонента оптической системы; Δ — расстояние между фокусами F_1' и F_2' компонентов оптической системы; f_1' , f_2' — задние фокусные расстояния компонентов оптической системы; L — длина системы, т. е. расстояние от перетяжки входного пучка до перетяжки выходного пучка; $Nd_{1,2}$ — диафрагменные числа компонентов (отношение фокусного расстояния к его световому диаметру); K_d — коэффициент, определяющий превышение светового диаметра компонента над диаметром преобразуемого на нем пучка (диаметр пучка, в котором сосредоточено 86,5 % потока излучения) [4, 11]; α — эквивалентное

продольное увеличение двухкомпонентной лазерно-оптической системы,

$$\alpha = \left(\frac{f'_2}{f'_1} \right)^2 \frac{1}{P(z_{p1}, \Delta)}. \quad (4)$$

Здесь $P(z_{p1}, \Delta)$ — полином, характеризующий зависимость продольного увеличения двухкомпонентной оптической системы от ее конструктивных параметров и параметров входного пучка,

$$P(z_{p1}, \Delta) = \left(1 + \frac{z_{p1}\Delta}{f_1'^2} \right)^2 + \left(\frac{z_{k1}\Delta}{f_1'^2} \right)^2.$$

Методика габаритного синтеза двухкомпонентных лазерно-оптических систем подробно рассмотрена в работах [4,11]. Используя ее для синтеза оптической системы технологических головок, установили, что для параметров входного пучка, соответствующих параметрам пучка волоконного лазера, габаритная задача имеет решение, когда параметры оптической системы удовлетворяют условиям $|z_{p1}\Delta| \ll f_1'^2$ и $z_{k1}|\Delta| \ll f_1'^2$. Поэтому значение полинома P в формуле (4) близко к единице, и параметры выходного пучка определяются главным образом отношением фокусных расстояний компонентов оптической системы и вносимыми ими искажениями.

Весьма важной задачей разработки оптической системы является обеспечение малых искажений распределения поля выходного лазерного пучка. Это свойство характеризует качество реальной оптической системы, с которым она формирует лазерный пучок по сравнению с идеальным преобразованием исходного лазерного пучка. Искажения лазерного пучка описываются системой параметров [12, 13], в которой определяющее значение имеет обобщенный параметр M^2 .

В работе [12] в скалярном приближении получено аналитическое выражение для приближенного расчета и анализа амплитудно-фазового распределения поля многомодового лазерного пучка на выходе реальной лазерно-оптической системы. В этом выражении коэффициент $\chi_{\text{eq}} = \chi + h_{\text{max}}^2 \left(\alpha + \frac{15}{16} \beta h_{\text{max}}^2 + \frac{7}{8} \gamma h_{\text{max}}^4 \right)$ определяет абберрации оптической системы: 50 % абберраций 3-го, 47 % — 5-го и 44 % — 7-го порядка. В выражении для χ_{eq} $2h_{\text{max}}$ — световой диаметр оптической системы, а коэффициенты $\chi, \alpha, \beta, \gamma$ характеризуют дефокусировку и абберрации лазерно-оптической системы 3-го и высших (5-го и 7-го) порядков.

В настоящей работе абберационный синтез оптической системы технологической головки проведен исходя из выполнения условия $\chi_{\text{eq}} \rightarrow 0$. Вторым условием является обеспечение фокусных расстояний узлов оптической системы, полученных при ее габаритном синтезе. Совместное выполнение этих условий приводит к алгебраическому уравнению. Малые дифракционные искажения выходного распределения поля обеспечиваются за счет использования линз оптической системы, световые диаметры которых превышают более чем в 2,5 раза диаметр пучка [13, 14].

Результаты расчета оптической системы технологической головки с лазером ЛС-4-К приведены в табл. 2. Параметры исходного пучка: диаметр входной перетяжки 50 мкм; параметр конфокальности пучка 0,31 мм; параметр $M^2 = 5,90$. Требуемые параметры пучка, формируемого оптической системой: размер перетяжки $h'_p = 0,090$ мм, параметр конфокальности $z'_k = 4,0$ мм.

Из табл. 2 следует наличие большого числа вариантов построения оптической системы технологической головки с разными конструктивными параметрами. Причем все варианты построения оптической системы позволяют получить требуемые параметры лазерного пучка в рабочей зоне без существенного увеличения параметра M^2 пучка, т. е. без ухудшения качества исходного лазерного пучка. Кроме того, имеются варианты, которые из-за недопустимо большой мощности паразитного отраженного излучения использовать нельзя.

Заключение.

Разработана методика синтеза оптической системы лазерной головки, обеспечивающая ее максимальную функциональность и минимальную стоимость изготовления и эксплуатации. Данная методика учитывает комплекс оптических, технологических, конструктивных и других факторов и позволяет:

- обеспечить в рабочей зоне требуемые параметры лазерного пучка (диаметр перетяжки, длину перетяжки);
- использовать оптическую систему с минимально возможным числом линз с наименее крутыми радиусами кривизны;
- исключить варианты оптической системы с недопустимо большими искажениями распределения поля лазерного пучка, уровнем потока обратного отражения или варианты с большими углами падения лучей на поверхности линз технологической головки.

Таблица 2

Пример синтеза вариантов оптической системы технологической головки лазера ЛС-4-К с диаметром волокна 50 мкм

K	f'	D _{св}	K _h	h' _p	s' _p	φ _{max}	dE		W _{max}	P _{отр}	d ₁	d ₂	L	d _{зар}
							max	min						
1	112,5	30	1,36	0,138	-345,5	6,1	0	-1,3	0,42	0	77,7	0	0	15,2
2	183,2	33,7	1	0,09	250,9	13,7	0	-0,2	0,01	0,02	77,7	40,2	482,7	30,4
2	193,9	35,6	1	0,09	270,8	13,4	0	-0,3	0,01	0,01	77,7	63,6	526	30,8
2	204,7	37,7	1	0,09	291,9	14,7	0	-0,3	0,01	0,01	77,7	84,8	569,6	32,1
2	215,5	39,6	1	0,09	311,5	13,2	0	-0,4	0,01	0,01	77,7	108,6	612,7	31,7
2	226,3	41,6	1	0,09	332,2	13,2	0	-0,4	0,01	0,01	77,7	130,7	656,1	32,2
2	237	43,4	1	0,09	350	12,7	0	-0,4	0	0,01	77,7	156,7	699,4	32,6
1	129,4	29,7	1,14	0,083	-245,3	6,1	0	-0,6	0,26	0	75,8	0	0	16
2	154,3	33,6	1	0,09	249,1	13,7	0	-0,1	0,01	0,02	75,8	30,4	469,7	31,4
2	163,3	35,6	1	0,09	269,4	13,7	0	-0,1	0,01	0,01	75,8	46,4	506,5	31,9
2	172,4	37,6	1	0,09	290,7	14,3	0	-0,2	0,01	0,01	75,8	61,3	543,5	33
2	181,5	39,5	1	0,09	309,1	13,6	0	-0,1	0,01	0,01	75,8	79,2	580,1	33
2	190,6	41,6	1	0,09	331,7	13,2	0	-0,3	0,01	0,01	75,8	93,7	617	33,3
2	199,6	43,4	1	0,09	349,6	13,2	0	-0,2	0,01	0,01	75,8	112,6	653,7	33,8
2	208,7	45,6	1	0,09	372	14,2	0	-0,3	0,01	0,01	75,8	125,5	690,8	35
2	217,8	47,4	1	0,09	391	13,6	0	-0,3	0,01	0,01	75,8	143,9	727,5	35,3
2	226,9	49,5	1	0,09	413	13,1	0	-0,3	0,01	0,01	75,8	157,8	764,3	35,3
1	146,2	29,5	1,06	0,063	-198	6,1	0	-0,3	0,16	2,69	77,3	0	0	9,3
2	137,6	33,6	1	0,09	249,9	14	0	-0,1	0,01	2,71	77,3	24,4	462,8	25
2	145,7	35,6	1	0,09	270,2	14	0	-0,1	0,01	2,71	77,3	37,5	496,7	25,5
2	153,7	37,7	1	0,09	291,4	14	0	-0,2	0,01	2,7	77,3	49,6	530,6	26
2	161,8	39,7	1	0,09	311,8	14	0	-0,2	0,01	2,7	77,3	62,6	564,4	26,5
2	169,9	41,6	1	0,09	330,9	14	0	-0,1	0,01	2,7	77,3	76,9	598,2	26,9

1	163,1	29,5	1,02	0,053	-174,4	5,3	0	-0,1	0,1	0,12	77,2	0	0	0	9,4
2	134,1	35,6	1	0,09	270,4	14,2	0	-0,2	0,01	0,14	77,2	32,8	491,6	0	25,8
2	141,6	37,6	1	0,09	290,6	15,1	0	-0,2	0,01	0,14	77,2	44,2	523,9	0	26,8
2	149	39,5	1	0,09	308,6	14,3	0,1	-0,1	0,01	0,13	77,2	57,6	555,9	0	27
2	156,5	41,7	1	0,09	331,8	14,7	0	-0,2	0,02	0,13	77,2	66	588,2	0	27,4
2	163,9	43,5	1	0,09	348,7	14,2	0,1	-0,1	0,01	0,13	77,2	81	620,2	0	28,1
2	171,4	45,7	1	0,09	372,3	14,7	0	-0,2	0,01	0,13	77,2	88,9	652,5	0	28,4
2	178,9	47,4	1	0,09	388,8	14,2	0,1	-0,1	0,01	0,13	77,2	104,4	684,5	0	29,2
2	186,3	49,6	1	0,09	412,8	14,6	0	-0,2	0,01	0,13	77,2	111,9	716,8	0	29,5
1	180	29,3	0,048	-157,5	4,9	0	-0,1	0,06	0,05	76,7	0	0	8,9	0	0,1
2	126	35,6	1	0,09	269,4	15,2	0,1	-0,2	0,02	0,06	76,7	31,1	488,3	0	25,6
2	133	37,6	1	0,09	290,7	15,9	0	-0,2	0,02	0,06	76,7	40,2	519,6	0	26,7
2	140	39,7	1	0,09	311,1	15,2	0	-0,2	0,02	0,06	76,7	50,3	550,6	0	26,6
2	147	41,6	1	0,09	330,6	14,7	0	-0,2	0,02	0,06	76,7	62,3	581,6	0	27
2	154,1	43,5	1	0,09	348,1	15	0,1	-0,2	0,02	0,06	76,7	74,2	612,6	0	28,1
2	161,1	45,6	1	0,09	371,8	16,1	0	-0,2	0,02	0,06	76,7	81,7	643,9	0	28,8
2	168,1	47,5	1	0,09	388,2	15	0,1	-0,2	0,02	0,06	76,7	95,4	674,8	0	29,2
2	175,1	49,6	1	0,09	412,2	15,1	0	-0,2	0,02	0,06	76,7	102,5	705,9	0	29,2
1	120	32	1,39	0,141	-368,6	6,1	0	-1,2	0,44	0	81,9	0	0	0	19,2
2	193,9	35,8	1	0,09	266,8	13,9	0	-0,1	0,01	0,01	81,9	43,6	509,5	0	35,2
2	204,7	37,6	1	0,09	290,9	13,4	0	-0,3	0,01	0,01	81,9	63,3	552,8	0	35,5
2	215,5	39,5	1	0,09	310,4	14,3	0	-0,3	0,01	0,01	81,9	86,3	596,2	0	36,7
2	226,3	41,5	1	0,09	331,7	13,2	0	-0,4	0,01	0,01	81,9	108,3	639,5	0	36,4
2	237	43,5	1	0,09	352,3	13,2	0	-0,4	0,01	0,01	81,9	130,3	682,9	0	37
2	247,8	45,6	1	0,09	367,8	13	0	-0,2	0,01	0,01	81,9	158	726,3	0	37,3

Окончание табл. 2

K	f'	D _{CB}	K _h	h' _p	s' _p	φ _{max}	dE		W _{max}	P _{орп}	d ₁	d ₂	L	d _{3ар}
							max	min						
1	102	31,9	1,94	0,418	-801,3	7,7	1,2	-4,6	0,73	0	82,6	0	0	7,6
2	245,4	33,7	1	0,09	248,4	15	0	-0,3	0,02	0,02	82,6	46,9	492,5	22,8
2	259,8	35,7	1	0,09	265,9	16,8	0	-0,5	0,02	0,11	82,6	99,5	563,1	24,7
2	274,2	37,4	1	0,09	291,5	14,3	0	-0,9	0	0,01	82,6	144,3	633,5	23,5
1	138	31,7	1,16	0,084	-261,5	6,1	0	-0,6	0,27	0	79,7	0	0	20,1
2	163,3	35,5	1	0,09	269,2	13,8	0	-0,1	0,01	0,01	79,7	30,5	496,6	36,3
2	172,4	37,5	1	0,09	290	13,2	0	-0,2	0,01	0,01	79,7	46,4	533,4	36,6
2	181,5	39,5	1	0,09	309,3	13,7	0	-0,1	0,01	0,01	79,7	62,8	570,2	37,3
2	190,6	41,6	1	0,09	331,2	14,3	0	-0,2	0,01	0,01	79,7	77,3	607,2	38,4
2	199,6	43,6	1	0,09	351,8	13,2	0	-0,3	0,01	0,01	79,7	93,7	643,9	38,1
2	208,7	45,4	1	0,09	369,6	13,2	0	-0,2	0,01	0,01	79,7	112,7	680,6	38,6
2	217,8	47,4	1	0,09	389,8	13,2	0	-0,2	0,01	0,01	79,7	128,7	717,4	39,2
2	226,9	49,4	1	0,09	410	13,4	0	-0,1	0,01	0,01	79,7	144,9	754,3	40,1
1	156	31,5	1,06	0,063	-212,8	6,1	0	-0,3	0,17	55,98	81,1	0	0	9,6
2	145,7	35,7	1	0,09	271	14	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	23,5	489,7	26,1
2	153,7	37,7	1	0,09	291,3	14,1	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	36,5	523,5	26,6
2	161,8	39,6	1	0,09	311,3	13,9	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	50,3	557,3	27
2	169,9	41,7	1	0,09	331,9	14	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	62,9	591,2	27,5
2	178	43,7	1	0,09	352,2	14	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	75,9	625	28,1
2	186,1	45,6	1	0,09	372,2	13,8	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	89,7	658,9	28,5
2	194,2	47,6	1	0,09	392,7	14	0	-0,2	0,01	55,99	81,1	102,2	692,7	29
2	202,3	49,4	1	0,09	410,5	13,3	0	-0,1	0,01	55,99	81,1	119,1	726,4	29,5

1	174	31,4	1,02	0,053	-185,6	5,2	0	-0,1	0,1	0,21	81	0	0	9,7
2	141,6	37,5	1	0,09	288,6	14,3	0,1	-0,2	0,01	0,22	81	34,5	518,3	27,1
2	149	39,6	1	0,09	310,1	14,7	0,1	-0,2	0,01	0,22	81	44,8	550,5	27,5
2	156,5	41,6	1	0,09	331	14,2	0	-0,2	0,01	0,22	81	56,1	582,7	27,8
2	163,9	43,6	1	0,09	350,6	14,7	0	-0,2	0,02	0,22	81	67,9	614,8	28,5
2	171,4	45,6	1	0,09	372,1	14,3	0	-0,2	0,02	0,22	81	78,9	647,1	28,8
2	178,9	47,4	1	0,09	388,7	14,2	0,1	-0,1	0,02	0,22	81	93,1	679,1	29,7
2	186,3	49,6	1	0,09	412,7	14,6	0	-0,2	0,02	0,21	81	100,6	711,4	30
1	127,5	34	1,43	0,145	-391,7	6,1	0	-1,2	0,47	0	87,1	0	0	20,4
2	204,7	37,7	1	0,09	286,8	13,9	0	-0,1	0,01	0,01	87,1	43,4	535,8	37,2
2	215,5	39,6	1	0,09	311,1	13,4	0	-0,3	0,01	0,01	87,1	63	579,2	37,4
2	226,3	41,6	1	0,09	332,2	13,6	0	-0,3	0,01	0,01	87,1	84,2	622,6	38,1
2	237	43,5	1	0,09	351,8	13,2	0	-0,3	0,01	0,01	87,1	108	665,9	38,4

Обозначения: K — номер компонента (1 — узел коллиматора, 2 — узел фокусатора); f' , $D_{\text{св}}$ — заднее фокусное расстояние и световой диаметр компонента, мм; K_h — коэффициент эффективного увеличения диаметра пучка реальной выходной перетяжки; H'_p — размер реальной выходной перетяжки, мм; s'_p — положение выходной перетяжки относительно последней поверхности компонента, мм; Φ_{max} — максимальный угол падения лучей на поверхность линз, град; dE — отклонение реальной плотности мощности в пятне фокусировки от идеальной формы, %; W_{max} — максимальная волновая aberrация оптической системы лазерной головки (в длинах волн); $P_{\text{отр}}$ — мощность паразитного отраженного излучения, Вт; d_1 — расстояние от торца волокна до коллиматора, мм; d_2 — расстояние между коллиматором и фокусатором, мм; L — длина технологической головки (расстояние от торца волокна до плоскости фокусировки), мм; $d_{\text{заг}}$ — длина заготовки для изготовления всех линз технологической головки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сравнение лазеров различных видов.
URL: http://www.ntoire-polus.ru/apps_lasers.html (дата обращения: 30.06.2013)
- [2] Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и лазерные пучки*. Москва, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990, 264 с.
- [3] Пахомов И.И., ред., Рожков О.В., Рождествин В.Н. *Оптико-электронные квантовые приборы: учеб. пособие для вузов*. Москва, Радио и связь, 1982, 456 с.
- [4] Пахомов И.И., Цибуля А.Б. *Расчет оптических систем лазерных приборов*. Москва, Радио и связь, 1986, 152 с.
- [5] Shirankov A.F. DVD System Software Simulaor, ISOM/ODS, *Joint International Sysposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2002*, Hawaii, 7-11 Jule 2002, WP10.
- [6] Ширанков А.Ф., Рожков О.В., Поздняков В.В. *Высокоразрешающая ОС одномерного квазилинейного сканирования лазерным пучком*. Пат. № 2227313 Российская Федерация, 2004.
- [7] Ширанков А.Ф., Рожков О.В. Оптика лазерной осветительной системы проекционного телевизора с матрицей микрозеркал. *Сб. науч. тр. VI междунар. конф. «Прикладная оптика»*. ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 2004, т. 1 (2), с. 433–436.
- [8] Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/laser/223.html> (дата обращения: 12.08.2013).
- [9] Основные характеристики промышленных волоконных лазеров. URL: <http://www.ntoire-polus.ru/HP%20fiber%20laser.pdf> (дата обращения: 30.06.2013).
- [10] Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Дубров В.Д., Егоров Э.Н., Низьев В.Г., Панченко В.Я. Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологии. *Сб. научн. тр. XXII Междунар. научно-техн. конф. «Лазеры в науке, технике, медицине»*, г. Геленджик, 19–24 сентября 2011 г. Москва, 2011, т. 22, с. 38–43.
- [11] Аниканов А.Г., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Структурный синтез лазерных оптических систем при ограничениях их параметров. *Оптический журнал*, 2010, т. 77, № 2, с. 30–36.
- [12] Пахомов И.И., Ширанков А.Ф., Носов П.А. Описание, расчет и анализ искажений многомодовых лазерных пучков. *Оптический журнал*, 2010, т. 77, № 2, с. 37–43.
- [13] Носов П.А. *Методы анализа и синтеза оптических систем для высококачественного преобразования лазерных пучков*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011, 150 с.
- [14] Носов П.А., Павлов В.Ю., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Аберрационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков. *Оптический журнал*, 2011, т. 78, № 9, с. 34–44.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ширанков А.Ф., Носов П.А., Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Якунин В.П., Третьяков Р.С. Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/926.html>

Ширанков Александр Федорович родился в 1950 г. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники». Автор более 240 опубликованных работ в области классической и лазерной оптики. e-mail: ashirankov@mail.ru

Носов Павел Анатольевич родился в 1984 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 опубликованных работ в области классической и лазерной оптики. e-mail: pan@bmstu.ru

Пахомов Иван Иванович родился в 1930 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области оптики, физики лазеров, расчёта оптических систем лазерных приборов, оптических систем переменного увеличения. e-mail: ashirankov@mail.ru

Григорьянц Александр Григорьевич родился в 1941 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 370 опубликованных работ, в том числе 19 монографий, учебников и учебных пособий. e-mail: mt12@bmstu.ru

Якунин Владимир Петрович родился в 1945 г. Канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПЛИТ РАН, автор более 110 научных публикаций в области лазерной оптики и лазерных технологических систем. e-mail: yvp_laser@inbox.ru

Третьяков Роман Сергеевич родился в 1985 г. Ассистент, аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области разработки лазерных технологических систем и технологий. e-mail: tretyakov.roman@gmail.com