УДК 535.317.1

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВОЙ ТРУБКИ

В.А. Зверев, И.Ю. Суворова

Выполнен анализ габаритных свойств и показана возможность применения для формирования световой трубки с переменными параметрами двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения с совмещенными осевыми точками предмета и изображения и трехкомпонентной системы переменного увеличения типа «коллектив».
Ключевые слова: лазерная установка, оптическая система, переменное увеличение.

Введение

Промышленная обработка материалов стала одной из областей наиболее широкого использования лазеров и, прежде всего, лазеров высокой мощности. Лазерное излучение применяется для резания и сваривания материалов, сверления отверстий и термообработки, обработки тонких металлических и неметаллических пленок, получения на них рисунков и микросхем. Для повышения эффективности применения и качества выполнения технологических операций лазерный пучок лучей в рабочей зоне должен иметь форму цилиндра конечной длины и малого диаметра. Эту задачу можно решить, используя свойства так называемой световой трубки.

Преобразование излучения плоского источника в световую трубку

Если угловая величина световых пучков лучей, излучаемых плоским источником, равна $2W$, то, дополнив его оптической системой, фокусное расстояние которой равно f', можно преобразовать излучение источника в световую трубку цилиндрической формы. При этом в соответствии с рис. 1 должно выполняться условие [1]

$$2f'tgW = D_0 = 2f'\sin\sigma', \qquad (1)$$

где D_0 – диаметр параллельного пучка лучей, излучаемых источником (диаметр источника излучения), $\sin\sigma'$ – задняя числовая апертура оптической системы. При малой величине углов условие (1) можно записать в виде

$$W = \sigma'. \qquad (2)$$

При малой величине угла W, а, следовательно, и угла σ', и при достаточно большой величине D_0 требуемая величина фокусного расстояния оптической системы может оказаться весьма большой, т.е. применение оптической системы позволит получить световую трубку диаметром D_0 и весьма большой длины, равной $H = D_0/2W$.

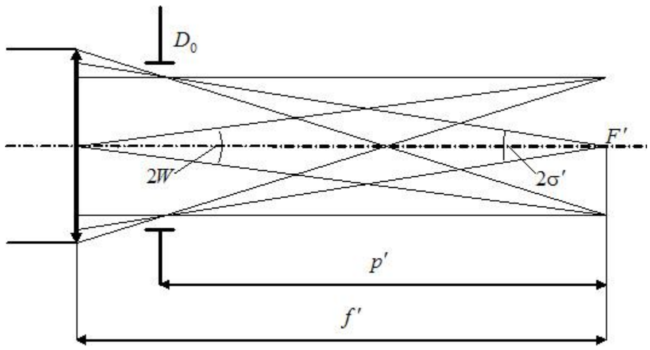

Рис. 1. Световая трубка цилиндрической формы

Для получения световой трубки требуемого диаметра D' и соответствующей длины дополним рассматриваемую оптическую систему афокальной системой кеплеровского типа, формирующей изображение с угловым увеличением, равным

$$|\Gamma| = \left|-\frac{f_1'}{f_2'}\right| = \left|\frac{W'}{W}\right| = \frac{D_0}{D'}. \qquad (3)$$

Отсюда следует известное свойство световой трубки:

$$D_0W = D'W'. \qquad (4)$$

Задачу построения требуемой световой трубки можно решить, если рассматриваемую оптическую систему целиком заменить одним телеобъективом. Однако решение задачи с помощью одной афокальной системы или одного телеобъектива практического значения не имеет, поскольку в этом случае изображение одного из торцов световой трубки будет мнимым. Поэтому полученную световую трубку можно считать промежуточной, а для получения действительного изображения световой трубки требуемого диаметра и соответствующей длины дополнить рассматриваемую систему еще одной афокальной системой кеплеровского типа. При этом длина поперечной трубки равна $H' = D'/2W'$. Но $D' = \; W/W' \; D$. Тогда $H' = \; W/2W'^2 \; D$. При этом

$$\frac{H'}{H} = \frac{W^2}{W'^2}. \tag{4}$$

Переменное преобразование излучения плоского источника в световую трубку

В лазерных технологических установках для повышения эффективности их применения параметры световой трубки должны быть переменными, т.е. угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой, должно быть переменным. Для этого второй компонент афокальной системы переместим вдоль оси в направлении распространения света (слева направо) на расстояние L. Если в этом промежутке поместим систему переменного поперечного увеличения V изображения, то угловое увеличение такой системы изображения равно

$$\Gamma = -V \frac{f_1'}{f_2'}. \tag{5}$$

Рассмотрим в промежутке $F_1'F_2 = L$ два тонких оптических компонента φ_1 и φ_2 с таким расчетом, чтобы точки F_1' и F_2 оказались оптически сопряженными. При этом расстояние между компонентами d и поперечное увеличение образованного ими изображения связаны соотношением [2]

$$d = \frac{1}{2}L \pm \sqrt{\frac{1}{4}L^2 - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_1\varphi_2}L - \frac{1}{\varphi_1\varphi_2}\frac{(1-V)^2}{V}}. \tag{6}$$

Расстояние от первого компонента до осевой точки предмета определяется формулой

$$a_1 = \frac{A \pm B}{2\varphi}, \tag{7}$$

где $A = \varphi_2(2-\varphi_1 d)(d-\varphi L)$; $B = \sqrt{(\varphi_1\varphi_2 d^2 + \varphi L)(\varphi_1\varphi_2 d^2 + \varphi L - 4)}$; $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2 d$.

По сути дела, выражения (6) и (7) представляют собой уравнения перемещения компонентов φ_1 и φ_2 при изменении поперечного увеличения изображения, образованного двухкомпонентной оптической системой. Двойной знак перед квадратным корнем в выражении (7) свидетельствует о том, что существуют две пары оптически сопряженных точек, расстояние между которыми в обоих случаях равно одной и той же величине L. При этом, согласно (7), отрезки $a_{11} = (A+B)/2\varphi$, а $a_{12} = (A-B)/2\varphi$.

Заметим, что в соответствии с выражением (6) при $V = 1/\tilde{V}$ расстояние между компонентами $d = \tilde{d}$.

В частном случае построения двухкомпонентной схемы оптической системы переменного увеличения можно положить $L = 0$. При этом формула (6) принимает вид

$$d = \sqrt{-\frac{1}{\varphi_1\varphi_2}\frac{(1-V)^2}{V}}. \tag{8}$$

Отсюда следует однозначная взаимосвязь знаков величин, определяющих расстояние d. В рассматриваемом случае представляет интерес так называемая инверсорная панкратика [3], состоящая из двух тонких компонентов и удовлетворяющая условиям $\varphi_1 + \varphi_2 = 0$, $L = 0$. При этом выражения (8) и (7) принимают вид

$$d = \sqrt{\frac{(1-V)^2}{V\varphi_1^2}} \text{ при } d \ge 0; \tag{9}$$

$$a_1 = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{(1-V)^2} \pm \sqrt{(1+V)^2}}{2\sqrt{V\varphi_1^2}}; \qquad (10)$$

$$\varphi = \varphi_1^2 d = \frac{1}{V}\sqrt{V(1-V)^2\varphi_1^2} = \frac{1}{V}\sqrt{V(1-V)^2\varphi_2^2}\,. \qquad (11)$$

Напомним, что вид соотношений (9) и (10), а, следовательно, значение расстояния d и величина отрезков a_1, остаются одними и теми же при $V = 1/\tilde{V}$. Это свойство полученных соотношений естественным образом определяет диапазон значений поперечных увеличений V и $\tilde{V} = 1/V$ при исследовании зависимости $a_1 = a_1(V)$: $0 < V \le 1$, $1 \le \tilde{V} < \infty$. При этом соотношение (10) удобно преобразовать и представить в виде

$$a_{11} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{(1-V)^2} + \sqrt{(1+V)^2}}{2\sqrt{V\varphi_1^2}} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{1}{\sqrt{V\varphi_1^2}}; \qquad (12)$$

$$a_{12} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{(\tilde{V}-1)^2} - \sqrt{(1+\tilde{V})^2}}{2\sqrt{\tilde{V}\varphi_1^2}} = -\frac{1}{\varphi_1} - \frac{1}{\sqrt{\tilde{V}\varphi_1^2}}\,. \qquad (13)$$

Пусть $\varphi_1 > 0$. Тогда выражения (12) и (13) можно переписать в виде

$$a_{11} = \frac{1-\sqrt{V}}{\varphi_1\sqrt{V}}; \qquad (14)$$

$$a_{12} = -\frac{1+\sqrt{\tilde{V}}}{\varphi_1\sqrt{\tilde{V}}}\,. \qquad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует, что при изменении поперечного увеличения в рассматриваемых пределах значения отрезков a_{11} и a_{12} изменяются соответственно в диапазонах $0 \le a_{11} < \infty$, $-\frac{2}{\varphi_1} \le a_{12} < -\frac{1}{\varphi_1}$. При этом принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при двух положениях плоскости предмета (при двух значениях поперечного увеличения изображения) имеет вид, показанный на рис. 2, а–б.

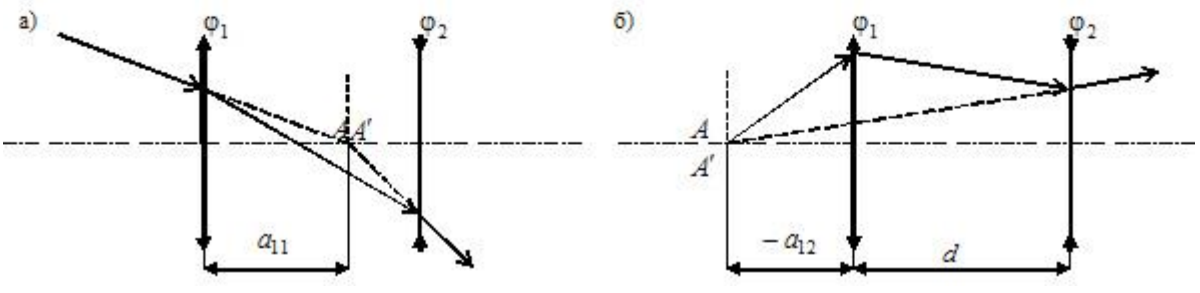

Рис. 2. Принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при $\varphi_1 > 0$

При $\varphi_1 < 0$ выражения (12) и (13) принимают вид

$$a_{11} = -\frac{1+\sqrt{V}}{\varphi_1\sqrt{V}}; \qquad (16)$$

$$a_{12} = \frac{1-\sqrt{\tilde{V}}}{\varphi_1\sqrt{\tilde{V}}}. \tag{17}$$

При этом отрезки a_{11} и a_{12} принимают значения в диапазонах $-2/\varphi_1 \le a_{11} < \infty$, $0 \le a_{12} < -1/\varphi_1$. В этом случае принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при двух положениях плоскости предмета имеет вид, показанный на рис. 3, а–б, а при обратном ходе лучей – рис. 2, б–а.

Пусть $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0$. Тогда $\varphi = \varphi_0 \;\; 2-\varphi_0 d$. При этом выражения (6) и (7) принимают вид

$$d = \frac{1}{2}L \pm \sqrt{\frac{1}{4}L^2 - \frac{2}{\varphi_0}L - \frac{1-V^{\;\;2}}{\varphi_0^2 V}}; \tag{18}$$

$$a_1 = \frac{1}{2}\;\; d-L \;\; \pm \frac{1}{2\varphi}\sqrt{\;\varphi_0^2 d^2 + \varphi L \quad \varphi_0^2 d^2 + \varphi L - 4\;}. \tag{19}$$

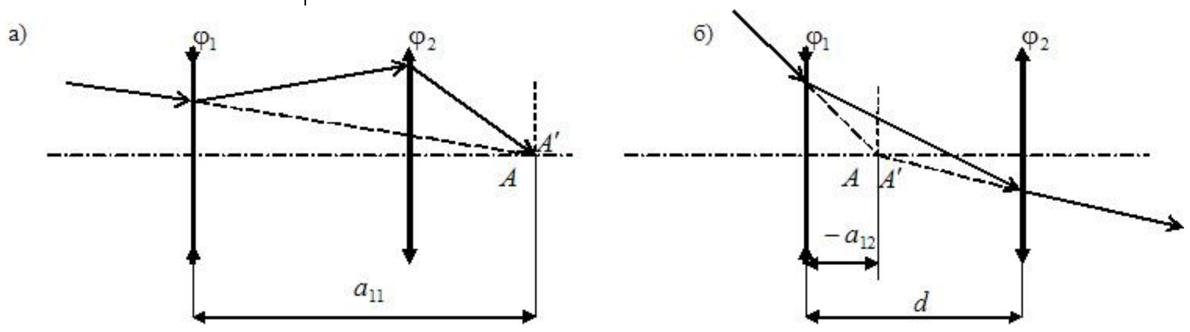

Рис. 3. Принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при $\varphi_1 < 0$

В оптической системе из двух тонких компонентов передний и задний фокальные отрезки равны соответственно

$$a_F = -\frac{1-\varphi_2 d}{\varphi},\; a'_{F'} = \frac{1-\varphi_1 d}{\varphi}.$$

При этом расстояние между главными плоскостями системы определяется как

$$d_{HH'} = d - a_F + a'_{F'} - \frac{2}{\varphi} = -\frac{\varphi_1\varphi_2 d^2}{\varphi}. \tag{20}$$

В рассматриваемом случае

$$d_{HH'} = -\frac{\varphi_0 d^2}{2-\varphi_0 d}. \tag{21}$$

Вариант принципиальной схемы двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения, когда оптические силы $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0$, может получить развитие, если принять $L = d_{HH'}$. Подставив при этом (21) в (19), получаем:

$$a_1 = \frac{d}{2-\varphi_0 d}. \tag{22}$$

Применив формулу отрезков, находим, что в этом случае

$$a'_1 = \frac{a_1}{1+a_1\varphi_0} = \frac{1}{2}d. \tag{23}$$

При этом

$$a_2 = a'_1 - d = -\frac{1}{2}d \tag{24}$$

и соответственно $a_2' = -d/(2-\varphi_0 d) = -a_1$.

Одновременное смещение компонентов в направлении оптической оси на некоторую величину Δ приведет к изменению поперечного увеличения и к расфокусировке изображения, характерным для смещении однокомпонентной оптической системы. Однако из соотношений (23) и (24) следует, что первый оптический компонент образует промежуточное изображение, расположенное внутри воздушного промежутка между компонентами на равном расстоянии от каждого из них. Вполне очевидно, что положение изображения не изменится, если совместить его с третьим оптическим компонентом, как показано на рис. 4, при этом не изменится и ход осевого пучка лучей.

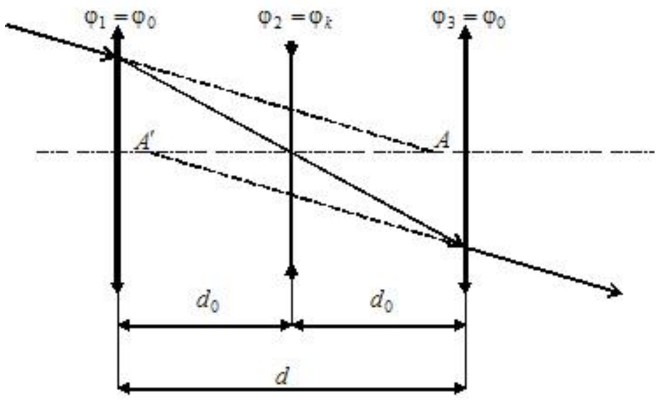

Рис. 4. Принципиальная схема трехкомпонентной оптической системы переменного увеличения типа «коллектив»

Для расчета параметров системы в качестве исходного параметра удобно использовать величину поперечного увеличения V_0 изображения, образованного первым компонентом в начальном положении системы [4]. При одновременном смещении крайних компонентов вдоль оптической оси на расстояние Δ принципиальную схему рассматриваемой оптической системы можно записать в следующем виде:

$\varphi_1 = \varphi_0$

$\varphi_2 = \varphi_k \quad d_1 = d_0 - \Delta$

$\varphi_3 = \varphi_0 \quad d_2 = d_0 + \Delta$.

Положение двух пар оптически сопряженных осевых точек, расстояние между которыми не изменяется при смещении крайних компонентов системы на предельную величину $\Delta = \Delta_0$, определяется выражениями вида

$$a_{011} = \frac{d_0}{V_0}, \tag{25}$$

$$a_{012} = \frac{1 + V_0(1-V_0)(1+\tilde{\Delta}_0^2)}{2V_0^2 - 1} d_0, \tag{26}$$

где $\tilde{\Delta}_0 = \Delta_0 / d_0$. При этом расстояние между оптически сопряженными точками равно

$$L_{01} = -2\frac{1-V_0}{V_0} d_0, \tag{27}$$

$$L_{02} = 2\frac{2(1+V_0) + V_0(1+\tilde{\Delta}_0^2)}{1-2V_0^2}(1-V_0) d_0. \tag{28}$$

Оптические силы компонентов равны

$$\tilde{\varphi}_0 = \varphi_0 d_0 = 1 - V_0, \tag{29}$$

$$\tilde{\varphi}_k = \varphi_k d_0 = -\frac{2}{1-V_0}\frac{V_0^3}{(1+V_0)^2 - V_0^2\tilde{\Delta}_0^2}. \tag{30}$$

И, наконец, при $\tilde{a}_{01} = \tilde{a}_{011} = a_{011}/d_0 = 1/V_0$ перепад увеличения изображения определяется выражением

$$\mu = 1 + \frac{4V_0(1+V_0)\tilde{\Delta}_0}{(1+V_0 - V_0\tilde{\Delta}_0)}. \tag{31}$$

При $\tilde{\Delta}_0 = 1$

$$\mu = (1 + 2V_0)^2. \tag{32}$$

Однако вполне очевидно, что из-за габаритных ограничений осуществить условие $\tilde{\Delta}_0 = 1$ практически невозможно.

Заключение

Приведенные соотношения позволяют определить параметры трехкомпонентной схемы оптической системы переменного увеличения типа «коллектив» при дискретной (оптической) компенсации расфокусировки изображения.

Световую трубку лазерного излучения формируют узкие пучки лучей, что определяет возможность применения любой из рассмотренных схем для построения афокальной системы переменного углового увеличения. При этом в соответствии с формулой (5) угловое увеличение изображения

$$\Gamma = -\frac{\tilde{f}_1'}{f_2'} = -\frac{f_1'}{\tilde{f}_2'},$$

где $\tilde{f}_1' = Vf_1'$, $\tilde{f}_2' = f_2'/V$. Вполне очевидно, что при изменении углового увеличения изображения, образованного афокальной системой, положение сформированной световой трубки относительно последнего компонента оптической системы в целом будет изменяться, что и следует учитывать при ее разработке.

Литература

1. Зверев В.А., Суворова И.Ю. Преобразование излучения плоского источника в световую трубку цилиндрической формы // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – №6. – С. 71–76.
2. Журова С.А., Зверев В.А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 10. – С. 68–86.
3. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 564 с.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1984. – 231 с.

Зверев Виктор Алексеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, post_vaz@rambler.ru

Суворова Ирина Юрьевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, d22022007@yandex.ru