

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Государственное учреждение профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

САНТАЛИНА Ирина Юрьевна

УДК 535.317; 681.7

**РАЗРАБОТКА СХЕМ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОВУЮ ТРУБКУ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы  
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена на кафедре прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
ЗВЕРЕВ Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
ВЕЙКО Вадим Павлович

кандидат технических наук  
ФИЛАТОВ Антон Александрович

Ведущее предприятие – ОАО «ЛЮМО», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «1» марта 2011 года в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 14, аудитория 314-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб ГУ ИТМО.

Отзывы и замечания (в 2 экз.) по автореферату направлять в адрес университета: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, секретарю диссертационного совета Д 212.227.01.

Автореферат разослан «29» января 2011 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.227.01,  
кандидат технических наук, доцент

**В.М. КРАСАВЦЕВ**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Развитие современного производства обуславливает все возрастающее внедрение наукоемких технологий. К ним относится лазерная обработка материалов. Такая обработка является одной из технологий, которые определяют современный уровень производства в промышленно развитых странах.

Спектр оборудования, используемого для лазерной обработки материалов, чрезвычайно широк. Большинство производителей поставляют на рынок не отдельные технологические лазеры, а лазерные технологические комплексы (ЛТК). Повышение требований к надежности и качеству высокотехнологичной продукции, стремление к миниатюризации приборов при повышении управляемости и гибкости всех систем привели в последние годы к быстрому росту спроса на ЛТК для лазерной микрообработки. Лазерные технологии микрообработки позволяют осуществлять микросварку и резку материалов, сверление сверхмалых отверстий, термообработку, обработку тонких металлических и неметаллических пленок, получение на них рисунков и микросхем и т.д.

При создании ЛТК важнейшее место занимает разработка оптической системы, с помощью которой, для достижения высокой плотности мощности, излучение лазера фокусируется вблизи обрабатываемой поверхности. Фокусирующие устройства в зависимости от фокусного расстояния применяемой оптической системы собирают лазерное излучение в пятно диаметром в десятые доли *мм*. Как показал опыт, для лазерной резки и сварки не очень тонких деталей принципиальное значение имеет не только поперечный размер фокального пятна, но и длина перетяжки, что лишний раз подтверждает потребность в формировании лазерного излучения в виде световой трубки.

### **Цель работы**

Разработка схем и методов расчета оптических систем, преобразующих излучение плоского излучателя (лазера) в световую трубку требуемых форм и размеров.

### **Задачи исследования**

1. Выполнить обзор оптических систем, используемых в технологии лазерной обработки
2. Выполнить анализ существующих расчетов фокусирующих систем.
3. Разработать базовые схемы формирования и преобразования световой трубки.

4. Разработать метод расчета оптической системы ЛТК, преобразующей излучение лазера в световую трубку требуемых форм и размеров.

### **Методы исследования**

1. Аналитические методы, основанные на применении соотношений параксиальной оптики и теории aberrаций третьего порядка.

2. Численные методы параметрического синтеза исследуемых оптических систем.

3. Компьютерное моделирование оптических систем, основанное на применении современных программ расчета оптики.

4. Методы оптимизации конструктивных параметров оптических систем по критериям качества образованного ими изображения.

### **Научная новизна диссертации**

1. На основе соотношений геометрической оптики показана возможность преобразования в световую трубку цилиндрической и конической форм.

2. Разработаны базовые схемы преобразования излучения лазера в световую трубку.

3. Разработан принцип построения системы переменного увеличения, позволяющей осуществлять изменение параметров световой трубки.

4. Разработан метод расчета оптической системы ЛТК, преобразующей излучение лазера в световую трубку требуемых форм и размеров.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Условие, определяющее взаимосвязь параметров лазера и световой трубки.

2. Принцип построения цилиндрической или конической световой трубки с помощью однокомпонентной оптической системы.

3. Условие лучевой прочности для разрабатываемой оптической системы.

4. Преобразование параметров световой трубки до требуемых значений с помощью афокальных систем кеплеровского типа.

5. Метод габаритного расчета оптической системы, преобразующей излучение лазера в световую трубку требуемых параметров.

6. Принцип построения системы переменного увеличения для изменения параметров световой трубки.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработанные схемы и метод расчета оптических систем позволяют преобразовывать излучение лазера в световую трубку требуемых форм и размеров на требуемом расстоянии от последнего оптического компонента и приемлемом расстоянии от источника излучения до крайнего сечения световой трубки.

2. Разработанный метод построения и расчета системы переменного увеличения для изменения параметров световой трубки, что позволяет повысить эффективность использования лазерного излучения в одном и том же ЛТК.

### **Апробация работы**

Основные результаты представлялись на IV Межвузовской конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2007 г.), V Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2007» (Санкт-Петербург), на XXXVII, XXXVIII и XXXIX научных и учебно-методических конференциях СПб ГУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010 г.г.), V, VI и VII Всероссийских межвузовских конференциях молодых ученых (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010 г.г.), IX Международной конференции «Прикладная оптика – 2010» (Санкт-Петербург).

В 2009 году данная работа была удостоена диплома победителя конкурса грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 40 наименований и 14-ти приложений; содержит 90 страниц основного текста, 58 рисунков и 16 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы направление исследования и требования к разрабатываемым схемам и методам расчета оптических систем, которые должны решать следующие задачи:

1. Фокусировать пучки лучей лазерного излучения в пятно заданного размера.
2. Фокусировать пучки лучей лазерного излучения на требуемом расстоянии от последней поверхности оптической системы.
3. Преобразовать излучение плоского источника (лазерное излучение) в световую трубку конической (в частном случае – цилиндрической) формы требуемых размеров.

**В первой главе** представлен анализ различных разработок оптических систем, который наглядно демонстрирует широкий интерес исследователей к

этому важному вопросу, определяющему уровень совершенства лазерной технологии.

Для успешной разработки лазерной технологии и оборудования необходимо детальное исследование влияния характеристик оптических фокусирующих систем на технологические параметры. Поскольку эффективность большинства процессов лазерной обработки в значительной степени определяется концентрацией энергии в пятне нагрева, основное внимание при проектировании фокусирующих систем обращается на достижение минимальных размеров фокального пятна.

**Во второй главе** рассмотрены методы расчета пространственной структуры лазерных пучков в параксиальном приближении.

Сформированный оптической системой лазерный пучок можно характеризовать диаметром  $2r'_p$  его минимального сечения (перетяжки), расходимостью  $2\theta'$  и расстоянием  $z'_p$  плоскости перетяжки от задней фокальной плоскости этой системы. Формулы для определения этих величин могут быть записаны в следующем виде:

$$Q = \frac{z'_k}{z_k} = -\frac{z'_p}{z_p} = \left(\frac{\theta}{\theta'}\right)^2 = \left(\frac{r'_p}{r_p}\right)^2 = \frac{f'^2}{z_k^2 + z_p^2}, \quad (1)$$

$$J_p = nr_p \theta = n'r'_p \theta' = const. \quad (2)$$

где  $Q$  – коэффициент продольного увеличения ближней зоны;  $z'_k = z'_p / \theta'$  – конфокальный параметр (длина ближней зоны) сформированного пучка;  $z_p$  – расстояние перетяжки от передней фокальной плоскости оптической системы;  $f'$  – заднее фокусное расстояние оптической системы. Величину  $J_p$  будем называть инвариантом лазерного пучка, использование которого, с одной стороны, позволяет сократить число операций при вычислении преобразования пучка через оптическую систему. С другой стороны, можно сделать важные практические выводы о характере преобразования лазерного пучка оптической системой. Из формулы (2) очевидно, что нельзя с помощью оптической системы одновременно уменьшить радиус сечения перетяжки и расходимость излучения. Уменьшение радиуса сечения перетяжки обязательно приводит к увеличению расходимости пучка. Уменьшить обе величины одновременно можно лишь уменьшив длину волны излучения либо увеличив показатель преломления среды, в которой формируется пучок.

Полученные соотношения полностью описывают форму, размеры и положение сформированного лазерного пучка. Формулы могут быть получены любым из рассмотренных в диссертации методов: волновым, сопряженных плоскостей, лучевых пакетов или двух лучей. При выборе метода для численных расчетов руководствуются соображениями простоты, наглядности,

особенностей используемых вычислительных средств, традиций, контекста общей решаемой задачи и т.д. Любой конкретный расчет, как правило, включает элементы более чем одного метода. При расчете афокальных систем наиболее целесообразно применение метода сопряженных плоскостей. При расчете преобразования пучков через оптические системы, положения главных и фокальных плоскостей которых известны, удобнее всего пользоваться готовыми формулами (1) и (2) (если необходимо знать параметры пучка в целом) либо использовать методы сопряженных плоскостей или двух лучей (если надо знать только диаметр пучка в какой-то плоскости или его расходимость). Расчет оптических систем, заданных только своими конструктивными параметрами (радиусы кривизны, показатели преломления, толщины промежутков), как правило, целесообразно проводить методом двух лучей. Этот же метод наиболее удобен при чисто графических решениях.

Широкое применение для расчета преобразования гауссовых пучков оптическими элементами и системами получил матричный метод расчета, где используются лучевые матрицы и комплексный параметр гауссова пучка.

Лучевая, или  $ABCD$  матрица связывает значения поперечных координат  $x, y$ , и наклона  $\sigma_x, \sigma_y$  световых лучей на входе и на выходе оптической системы

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ n_2 \sigma_{2x} & n_2 \sigma_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ n_1 \sigma_{1x} & n_1 \sigma_{1y} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где индекс 1 соответствует входной плоскости  $ОП_1$ , а 2 – выходной  $ОП_2$ ;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред (см. рис. 1).

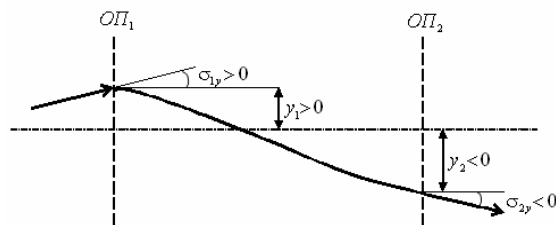


Рис. 1 К определению лучевой матрицы

Произведение матриц в (3) далее вычисляется в соответствии с его стандартным определением. Будучи записанным для какой-то одной из двух координатных пар, эта формула приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ N_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $AD - BC = 1$ ;  $N_2 = n_2 \sigma_{2y}$ ;  $N_1 = n_1 \sigma_{1y}$ .

Если имеется сложная оптическая система, то ее действие в целом (преобразование лучей из плоскости  $ОП_1$  в плоскость  $ОП_2$ ) характеризуется

также матрицей типа  $M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ , полученной путем перемножения всех матриц, характеризующих каждый оптический элемент в отдельности. Следует помнить, что при записи результирующей матрицы нужно соблюдать строгую последовательность: перемножение осуществляется от выхода системы к входу, т.е. матрица последнего оптического элемента умножается на матрицу предыдущего элемента и т.д. ( $M = M_n M_{n-1} \dots M_2 M_1$ ). Определитель результирующей матрицы всегда должен быть равен единице (это свойство используется и для проверки правильности проделанных преобразований).

Лучевая матрица удобна тем, что сама она рассчитывается в геометрическом приближении, но значение ее элементов позволяет описать прохождение светового пучка через оптическую систему в дифракционном приближении, в том числе для лазерных гауссовых пучков.

Кривизна сферического волнового фронта определяется выражением  $r_1 = y_1 / \sigma_{1y}$ . Однако удобнее пользоваться понятием «приведенное значение» радиуса кривизны  $R = r_1 / n_1 = y_1 / n_1 \sigma_{1y} = y_1 / N_1$ . Использование приведенных значений дает следующее преимущество: при пересечении плоской границы раздела двух сред значение  $R$  для соответствующего волнового фронта не меняется. Для сферического волнового фронта, центр которого расположен на оси и данной опорной плоскости, значение  $R$  является единственным параметром, который полностью определяет форму волнового фронта.

Х. Когельник предложил ввести для характеристики лазерного излучения так называемый комплексный параметр кривизны  $q(z)$ , который связан с  $R$  и

$$r^2(z) \text{ соотношением: } \frac{1}{q} = \frac{1}{R} + i \frac{\lambda}{\pi r^2(z)}.$$

Для описания преобразования гауссова пучка при его распространении от опорной плоскости  $z = z_1$  до опорной плоскости  $z = z_2$  необходимо указать правило перехода от параметров  $r(z_1)$ ,  $R(z_1)$  к параметрам  $r(z_2)$ ,  $R(z_2)$  или иными словами, правило перехода от  $q(z_1)$  и  $q(z_2)$ . Этим правилом является приведенный ниже закон  $ABCD$ :

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (5)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – комплексные параметры пучка в одной и другой опорных плоскостях;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – элементы лучевой матрицы, описывающей оптическую систему между опорными плоскостями.

**В третьей главе** рассмотрены расчеты фокусирующих систем.



Параксиальный расчет оптических систем преобразования лазерного излучения базируется на рассмотренных в главе 2 методах расчета пространственной структуры лазерных пучков.

Сформированный оптической системой пучок характеризуется диаметром его минимального сечения (перетяжки), расходимостью и расстоянием плоскости перетяжки от задней фокальной плоскости системы. Причем отношение диаметра перетяжки к расходимости есть конфокальный параметр сформированного пучка. Как правило, значение этого параметра не совпадает с конфокальным параметром пучка излучаемого лазером. Поэтому, в случае преобразования исходного лазерного пучка в пучок с заданными геометрическими параметрами, необходимо провести расчет согласующей оптики.

Преобразованная оптической системой световая трубка имеет вид однополосного гиперboloида вращения. Диаметры торцов световой трубки равны заданному диаметру сфокусированного пучка. Величина диаметра минимального сечения световой трубки соответствует диаметру перетяжки пучка. При этом перетяжка должна быть расположена точно посередине между ее торцами.

При использовании в качестве фокусирующей системы дифракционного оптического элемента (ДОЭ) можно выделить три вида параметров, характеризующие процесс разработки такого фокусатора. К первому виду относятся физические параметры, положенные в основу расчета фазовой функции фокусатора, – фокусное расстояние, рабочая длина волны, размеры фокусатора и области фокусировки. Ко второму виду относятся параметры дискретизации и квантования фазовой функции фокусатора, размер и форма элементов (модулей) дискретизации. Эти параметры связаны с выбором устройства регистрации ДОЭ. К третьему виду параметров относятся дифракционные характеристики фокусатора – энергетическая эффективность, ширина фокальной линии, среднеквадратическое отклонение полученного распределения интенсивности от требуемого в фокальной области и т.п. Для проектирования фокусаторов первые два вида параметров являются внутренними, а дифракционные параметры – внешними; последние получаются в результате работы фокусатора с выбранными внутренними параметрами. Для исследования фокусатора важно выявить связь внешних и внутренних параметров. Причем, учитывая трудоемкость и многовариантность процедуры изготовления ДОЭ, исследовать характеристики фокусатора необходимо уже на стадии проектирования.

**В четвертой главе** разработаны схемы и методы расчета оптических систем преобразования излучения в световую трубку.

Согласно теореме Штраубеля: произведение квадрата показателя преломления, проекции элементарной площадки (контур которой определяет

контур световой трубки) на плоскость, перпендикулярную оси трубки, и элементарного телесного угла с вершиной в точке этой площадки остается инвариантным для элементарной световой трубки, претерпевающей преломления на каком угодно числе преломляющих поверхностей, т.е.

$$n_1^2 d\Omega_1 dS_1 \cos \gamma_1 = \dots = n_v^2 d\Omega_v dS_v \cos \gamma_v = \dots = n_p^2 d\Omega_p dS_p \cos \gamma_p = d^2 J \quad (6)$$

При круглой форме площадок  $dS$  и равных углах  $\gamma$  соотношение (6) можно записать в виде (см. рис. 2):

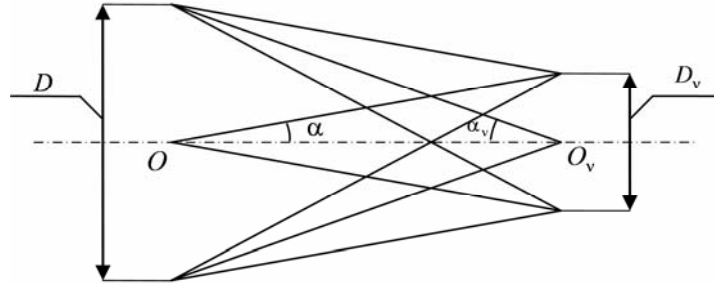


Рис. 2 Сечение световой трубки меридиональной плоскостью

$$nD \sin \alpha = n_v D_v \sin \alpha_v = \dots = n' D' \sin \alpha' = n'_v D'_v \sin \alpha'_v, \quad (7)$$

где  $D'$  и  $D'_v$  – соответственно диаметры изображений площадок  $dS$  и  $dS_v$ , образованных сколь угодно сложной оптической системой.

Из соотношений (7) следует, что условие  $D = D_v$  или  $D' = D'_v$  определяет цилиндрическую форму световой трубки. При соблюдении этих условий угол  $\alpha = \alpha_v$ , а угол  $\alpha' = \alpha'_v$ . Очевидно, что длина световой трубки в этом случае составляет:

$$R = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \alpha_v} = \frac{D_v}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{D_v}{2 \operatorname{tg} \alpha_v}, \quad (8)$$

$$R' = \frac{D'}{2 \operatorname{tg} \alpha'} = \frac{D'_v}{2 \operatorname{tg} \alpha'_v}. \quad (9)$$

Из соотношений (7) также находим, что

$$D \sin \alpha = D' \sin \alpha'.$$

Применив это соотношение и полагая угловые величины малыми, выражение (9) преобразуем к виду:

$$R' = \frac{D'^2 \cos \alpha'}{2D \sin \alpha} \approx \frac{D'^2}{2D \alpha}. \quad (10)$$

Если угол  $\alpha$  считать равным половине угла расходимости пучка лучей, излучаемого источником (лазером), а диаметр плоского источника излучения считать равным  $D$ , т.е. считать источник излучения известным (выбранным), то выражение (10) определяет взаимосвязь возможных значений параметров  $D'$

и  $R'$  световой трубки цилиндрической формы или требуемые параметры  $D$  и  $\alpha$  источника излучения при заданных параметрах световой трубки.

Рассмотрим возможный вариант построения цилиндрической световой трубки с помощью однокомпонентной оптической системы  $\phi$ , фокусное расстояние которой равно  $f'$ , как показано на рис. 3. На этом рисунке

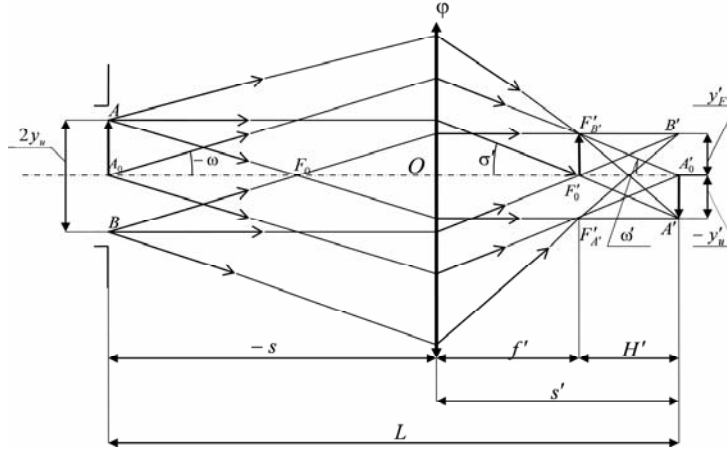


Рис. 3 Построение световой трубки цилиндрической формы

отрезок  $AB$  равен диаметру источника излучения ( $AB = D_u = 2y_u$ ), а угол расходимости излучаемого им пучка лучей равен  $-2\omega$ ; отрезок  $A'B'$  равен диаметру изображения источника излучения ( $A'B' = D'_u = -2y'_u$ ). Диаметр светового пучка лучей в задней фокальной плоскости компонента  $\phi$  определяется как:

$$F'_A F'_B = D'_{F'} = -2f'tg\omega. \quad (11)$$

В соответствии с рисунком отрезок

$$A'B' = D'_u = 2H'tg\sigma', \quad (12)$$

где  $H'$  – расстояние от задней фокальной плоскости компонента  $\phi$  до плоскости изображения источника излучения;  $\sigma' = \arcsin(D_u/2f')$ .

Пусть  $D'_{F'} = D'_u$ . Тогда, учитывая, что угловые величины малы, без заметной потери точности получаем

$$H' = -\frac{D_u^2}{2D_u\omega}. \quad (13)$$

Заметим, что смысл формулы (13) тот же, что и у формулы (10).

Угловая величина дифракционной расходимости параллельного пучка лучей определяется соотношением

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (14)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $D$  – диаметр излучателя. При  $D = D_u$  и  $\omega = -\theta$  формула (13) принимает вид

$$H' = \frac{D_u'^2}{2,44\lambda}. \quad (15)$$

Отсюда следует, что чем меньше длина волны излучения, тем больше длина цилиндрической световой трубки при одном и том же ее диаметре или тем меньше диаметр трубки при одной и той же ее длине.

В соответствии с рис. 3, формирование световой трубки цилиндрической формы определяется условием  $y'_u = -y'_{F'}$ . При этом фокусное расстояние оптического компонента определяется формулой

$$f' = -s + \frac{1}{4\omega} D_u \left( 1 + \sqrt{1 - 8 \frac{s\omega}{D_u}} \right). \quad (16)$$

При  $\omega = -\theta$  имеем

$$f' = -s - \frac{1}{4,88\lambda} D_u^2 \left( 1 + \sqrt{1 + 9,76 \frac{s\lambda}{D_u^2}} \right).$$

При  $s = -500 \text{ мм}$ ,  $D_u = 50 \text{ мм}$  и  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  фокусное расстояние  $f' = -95,66 \cdot 10^3 \text{ мм} \approx -95,66 \text{ м}$ ,  $D'_u = 49,74 \text{ мм}$ ,  $H' = 95,16 \cdot 10^3 \text{ мм} \approx 95,16 \text{ м}$ .

Если на расстоянии  $R$  от источника параллельного пучка лучей расположить экран, то радиус дифракционного изображения точки определяется формулой  $r = 1,22\lambda R/D_u$ . Положив  $r = 0,5D_u$ , получаем  $R = D_u^2/2,44\lambda$ . При  $D_u = 50 \text{ мм}$  и  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  расстояние  $R = 96,66 \text{ м}$ . При этом стрелка прогиба сферы сравнения радиуса  $R$ , опирающейся на контур источника излучения, то есть волновая aberrация в изображении точки, составляет  $W = \frac{D_u^2}{8R} = \frac{2,44\lambda}{8} < \frac{\lambda}{3}$ .

Из сопоставления абсолютных значений величин  $R$  и  $f'$  следует, что на расстоянии, равном  $f'$ , и без оптического компонента диаметр дифракционного пятна рассеяния равен диаметру источника излучения, при этом волновая aberrация в изображении точки не превышает  $\lambda/3$  (дифракция Фраунгофера).

Из соображений лучевой прочности плотность потока излучения в любом сечении лазерного пучка лучей на поверхностях и внутри оптической системы не должна превышать предельного значения

$$E = \frac{\Phi_{\max}}{S_{\text{пред}}} \leq E_{\text{пред}}, \quad (17)$$

где  $\Phi_{\max}$  – максимальный поток излучения;  $S_{\text{пред}}$  – допустимая площадь поперечного сечения лазерного пучка лучей. Отсюда находим, что предельно допустимая площадь сечения лазерного пучка лучей не должна превышать величины:

$$S_{пред} = \frac{\Phi_{max}}{E_{пред}} = \frac{2Q_{имп}}{\tau E_{пред}}, \quad (18)$$

где  $Q_{имп} = \Phi_{max} \tau/2$  – энергия излучения в импульсе;  $\tau$  – длительность импульса.

Полагая любое сечение лазерного пучка лучей круглым, предельный диаметр сечения лазерного пучка в оптической системе определяется следующим выражением:

$$D_{пред} = 2 \sqrt{\frac{2Q_{имп}}{\pi \tau E_{пред}}}. \quad (19)$$

Для последующего преобразования полученной световой трубки рассмотрим афокальную оптическую систему, состоящую из двух тонких компонентов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Пусть  $s$  – расстояние от первого компонента афокальной системы до плоскости предмета. Тогда расстояние от второго компонента афокальной системы до плоскости изображения определится выражением вида

$$s' = V^2 s - V(1-V)f'_1, \quad (20)$$

где  $V = -f'_2/f'_1$ . Очевидно, что изображение предмета будет действительным, если  $s' \geq 0$ , а следовательно, если

$$s - \frac{1-V}{V} f'_1 \geq 0. \quad (21)$$

Если  $0 < V < 1$ , это условие соблюдается при  $s \geq f'_1(1-V)/V$ ; если  $0 > V > -1$ , то при  $s \leq f'_1(1-V)/V$ .

Положение крайних сечений световой трубки, образованной первым компонентом рассматриваемой оптической системы при его оптической силе  $\varphi < 0$ , удовлетворяет второму из приведенных условий, то есть при  $V < 0$ , что соответствует применению для последующего преобразования световой трубки афокальной системы кеплеровского типа. В приведенном выше примере получена световая трубка цилиндрической формы при  $D_u = D'_u = 50 \text{ мм}$  с помощью оптического компонента, фокусное расстояние которого  $f' = -95,66 \cdot 10^3 \text{ мм}$ . Пусть с помощью последующей афокальной системы требуется получить световую трубку цилиндрической формы при  $D''_u = 0,5 \text{ мм}$  ( $D''_u = -2y''_u$ ). При этом поперечное увеличение изображения, образованного афокальной системой,  $V = y''_u/y'_u = -0,01^\times$ .

Будем считать, что расстояние между оптическим компонентом  $\varphi$  и первым компонентом афокальной системы  $\varphi_1$  равно нулю. Тогда, положив в выражении (21)  $V = -0,01^\times$ , а отрезок  $s = f' = -95,66 \cdot 10^3 \text{ мм}$ , получаем  $f'_1 = 947,13 \text{ мм}$ ,  $f'_2 = 9,47 \text{ мм}$ . Полученные значения величин определяют параметры оптической системы, которая формально решает задачу построения

требуемой световой трубки. Однако при этом остается нерешенной проблема получения требуемого расстояния от последнего компонента афокальной системы до ближайшего сечения световой трубки.

Конструктивно более приемлемое решение задачи построения требуемой световой трубки получается в два этапа. На первом этапе определяются параметры афокальной системы при  $V_1 = -D'_u/D_u$ , где  $D'_u$  – некоторое промежуточное значение диаметра световой трубки. При этом изображение одного из сечений световой трубки, образованное афокальной системой, может быть мнимым, что определяет произвольный выбор фокусного расстояния первого компонента афокальной системы.

На втором этапе определяются параметры второй афокальной системы при  $V_2 = -D''_u/D'_u$  для получения световой трубки требуемого диаметра  $D''_u$  и ее длины  $H''$ .

Для получения требуемого расстояния от последнего компонента оптической системы до изображения световой трубки второй компонент афокальной системы можно заменить двухкомпонентной системой обратного телеобъектива.

Промежуточную световую трубку цилиндрической формы можно сформировать непосредственно с помощью телеобъектива, как показано на рис. 4. Расстояние  $s_1$  от плоскости источника до первого компонента

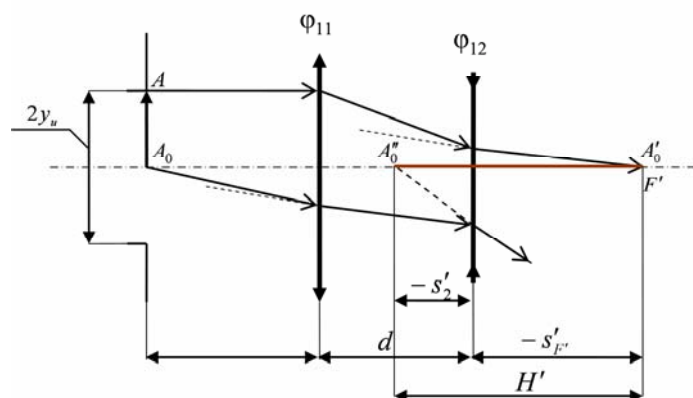


Рис. 4 Схема формирования световой трубки с помощью телеобъектива

телеобъектива считаем заданным, а поперечное увеличение  $V$  изображения, определяющего поперечные размеры световой трубки с промежуточными параметрами, выбранным. Тогда

$$\varphi_{12} = \varphi - \frac{1 - s_1 \varphi V}{V} \varphi_{11}. \quad (22)$$

При известном значении величины  $\varphi$  соотношение (22) определяет взаимосвязь оптических сил телеобъектива.

Для формирования цилиндрической световой трубки необходимо, чтобы диаметры обоих ее торцов были равны, то есть  $D'_{F'} = D'_u = VD_u$ . Тогда, в

соответствии с выражением (11), оптическая сила телеобъектива  $\varphi = 1/f' = -2\omega/VD_u$ , а выражение (22) принимает вид

$$\varphi_{12} = -\frac{1}{V} \left[ \left( 1 + \frac{2\omega}{D_u} s_1 \right) \varphi_{11} + \frac{2\omega}{D_u} \right]. \quad (23)$$

При  $\omega = -\theta$  имеем

$$\varphi_{12} = -\frac{1}{V} \left[ \left( 1 - \frac{2,44\lambda}{D_u^2} s_1 \right) \varphi_{11} - \frac{2,44\lambda}{D_u^2} \right]. \quad (24)$$

При этом длина  $d$  между компонентами телеобъектива и его задний фокальный отрезок  $s'_{F'}$  определяются из следующих выражений:

$$d = \frac{1}{\varphi_{12}} \left( \frac{V-1}{V} + s_1 \varphi \right); \quad (25)$$

$$s'_{F'} = \frac{1 - \varphi_{11} d}{\varphi}. \quad (26)$$

Если преобразованная световая трубка имеет вид усеченного конуса, то  $D'_{F'} \neq D'_u$ . Пусть  $\gamma = D'_{F'}/D'_u = -2\omega/VD_u\varphi$ , тогда

$$\gamma = -\frac{2\omega}{D_u} \cdot \frac{1 + s_1 \varphi - \varphi_{12} d}{\varphi}. \quad (27)$$

В общем случае  $\gamma = \gamma(s_1, d)$ . Оптические силы линз определяем при  $\gamma = \gamma_0$  (например, при  $\gamma = 1$ ). При выбранной величине отрезка  $s_1$  расстояние  $d$  находим из выражения (27):

$$d = \frac{1}{\varphi_{11}\varphi_{12}} \left( \varphi_{11} + \varphi_{12} - \frac{\varphi_{12}}{1 - (s_1 + \gamma D_u/2\omega)\varphi_{11}} \right). \quad (28)$$

При  $\omega = -\theta$  имеем

$$d = \frac{1}{\varphi_{11}\varphi_{12}} \left( \varphi_{11} + \varphi_{12} - \frac{\varphi_{12}}{1 + (s_1 - \gamma D_u^2/2,44\lambda)\varphi_{11}} \right). \quad (29)$$

Изменяя величину  $\gamma$ , при неизменном отрезке  $s_1$ , находим расстояние  $d$ .

Заметим, что  $V = V(s_1, d)$ . При  $V = const$  это уравнение становится вторым в системе связывающей величины  $s_1$  и  $d$ .

Эффективность использования лазерного излучения можно существенно повысить, если в одном и том же лазерном технологическом комплексе осуществлять изменение параметров световой трубки. Эту задачу можно решить с помощью системы переменного увеличения, например трехкомпонентной системы типа «коллектив», поместив ее во второй афокальной системе, как показано на рис. 5.

Такая система переменного увеличения состоит из двух одинаковых крайних жестко связанных компонентов и расположенного между ними неподвижного компонента. При среднем положении крайних компонентов

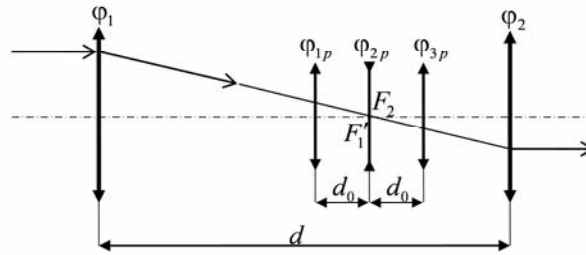


Рис. 5 Схема афокальной системы с трехкомпонентной системой переменного увеличения

увеличение системы равно  $+1^{\times}$ .

Для вычисления параметров панкратической системы в качестве исходного удобно использовать поперечное увеличение изображения, образованного первым компонентом при начальном положении компонент в схеме. При этом оптическая сила крайних компонентов будет определяться выражением

$$\varphi_{1p} = \varphi_{3p} = \frac{1 - V_0}{d_0}, \quad (30)$$

а среднего компонента:

$$\varphi_{2p} = -\frac{2V_0^3}{d_0(1 - V_0)(1 + 2V_0)} \quad (31)$$

При смещении крайних компонентов на величину  $\Delta = \pm d_0$  перепад увеличения равен

$$m = \frac{V(+d_0)}{V(-d_0)} = (1 + 2V_0)^2. \quad (32)$$

**В пятой главе** в качестве примера приведено два варианта расчета оптической системы преобразующей лазерное излучение в световую трубку, параметры которой соответствуют техническим требованиям. Первый вариант – это оптическая системы, состоящая из двух афокальных систем; второй – оптическая система, состоящая из телеобъектива и афокальной системы. Расчет параметров оптических систем основывается на представленных в четвертой главе формулах.

### Заключение

Основные результаты исследований, изложенные в работе:

1. На основе соотношений геометрической оптики показана возможность преобразования излучения лазера в световую трубку цилиндрической или конической формы и получено условие, определяющее взаимосвязь параметров лазера и световой трубки.



2. Определены базовые схемы формирования и преобразования световой трубки.

3. Разработаны методы расчета оптической системы ЛТК, преобразующей излучение лазера в световую трубку цилиндрической и конической форм на требуемом расстоянии от последней поверхности оптической системы.

4. Разработан принцип построения системы переменного увеличения, позволяющей осуществлять изменение параметров световой трубки.

5. Применение разработанных базовых схем построения оптических систем формирования и преобразования световых трубок и разработанных методов их расчёта проиллюстрировано на конкретных числовых примерах.

#### **По теме диссертации опубликованы следующие работы**

1. Зверев В.А., Суворова И.Ю. Разработка и расчет технологической установки // Сборник трудов V-ой Международной конференции «Оптика – 2007». СПб, 2007. С. 316 – 318.

2. Зверев В.А., Суворова И.Ю. Преобразование излучения плоского источника в световую трубку цилиндрической формы // Оптический журнал т. 75, №6, 2008. С. 71 – 76.

3. Зверев В.А., Суворова И.Ю. Оптическая система переменного преобразования световой трубки // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2009, №03(61). С. 14 – 21.

4. Сантали́на И.Ю. Способы формирования излучения плоского источника в различные формы // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. Выпуск 2. Труды молодых ученых / Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 193 с. С. 63 – 65.

5. Сантали́на И.Ю. Преобразование структуры лазерного пучка лучей // Труды IX-ой Международной конференции «Прикладная оптика – 2010», СПб, 2010. С. 167 – 171.