

文章编号 1004-924X(2006)02-0167-04

# LDA 耦合系统透镜导管的理论与实验研究

刘晓娟,傅汝廉,秦 华,史新刚,卓然然,郜洪云  
(南开大学 现代光学研究所,天津 300071)

**摘要:**用光线追迹的方法,理论推导了透镜导管各参数优化的一般公式,给出了优化参数;在此基础上,模拟了导管内光线的传输,统计了透镜导管出射光束的强度分布,讨论了各参数对耦合效果的影响。依据理论优化的结果,设计加工了透镜导管并进行了耦合实验,测量了输出光束的强度分布,给出了光斑图像。实验测得耦合效率高于 91%,输出光束强度分布平滑均匀,光斑质量良好,与理论模拟吻合并优于以往的研究结果。

**关键词:**激光技术;透镜导管;二极管阵列;耦合系统

**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A

## Theoretical and experimental research on lens duct for LDA coupling

LIU Xiao-juan, FU Ru-lian, QIN Hua, SHI Xin-gang, ZHUO Ran-ran, GAO Hong-yun

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin, 300071*)

**Abstract:** Based on the numerical analysis of ray tracing, the general expressions of the parameters in optimization design of the lens duct were theoretically deduced. Using the theoretical model, the light transmission trace in the duct was simulated, and the light intensity distribution of the output beam was calculated. The influence of the parameter's value on the coupling effect was also analyzed. Based on the optimum designing, a lens duct was fabricated and applied to a laser system, and the coupling experiment was implemented. The experimental results show that a smooth and symmetric beam with a good quality can be obtained at the output duct end. The coupling efficiency of the lens duct is above 91%. The results of the experiment agree well with the theoretical analysis, and are better than the results reported previously.

**Key words:** laser technique; lens duct; laser diode array; coupling system

## 1 引 言

激光二极管(LD)及其阵列(LDA)泵浦的全固化激光器兼具半导体和固体激光器的双重优点,是近年来激光器发展的热点之一<sup>[1-2]</sup>。但是,

激光二极管阵列发光面积大、出射光束发散角大、快慢轴方向不对称<sup>[3]</sup>,所以设计合适的耦合系统,使 LDA 发射的光束与固体激光器的光场有效地匹配,成为全固化激光器最关键的技术之一。

透镜导管是 90 年代出现的一种端泵浦耦合装置<sup>[3-5]</sup>,利用会聚作用和传输引导作用将 LDA

发射的光束耦合进激光工作介质,具有传输效率高、会聚光场质量好、成本低、易加工、便于调节等诸多优点。以往关于透镜导管的报道重在理论分析<sup>[3-6]</sup>,本文主要从理论分析和耦合实验两部分对透镜导管进行了研究。理论部分采用光线追迹的方法,推导了透镜导管各参数间的制约关系,进而实现对透镜导管各参数的优化,这是以往的研究所未有报道的;在理论优化的基础上,模拟了透镜导管的耦合效果并讨论了各参数对耦合效果的影响。实验部分得到了透镜导管输出光斑的图像,测量了透镜导管输出光束的强度分布和耦合效率。实验结果与理论分析吻合良好并优于以往的研究结果。

## 2 LDA 及激光耦合系统简介

如图 1 所示,激光二极管面阵列由 9 条线阵组成,每条线阵长 10 mm,彼此间距 0.4 mm。

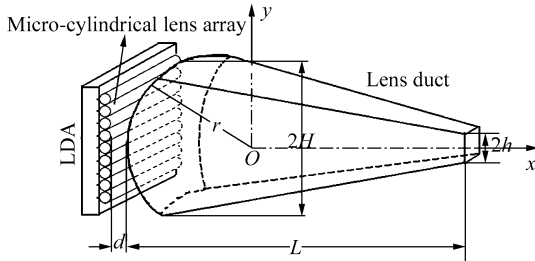


图 1 LDA 及耦合系统示意图

Fig. 1 Schematic of LDA and coupling system

耦合系统由微柱透镜阵列和透镜导管组成。微柱透镜阵列紧贴 LDA 放置,其作用是压缩激光二极管阵列快轴方向发散角。实验中发现,压缩后快轴方向发散角为  $10^\circ$  左右时(与慢轴方向发散角相近),透镜导管输出近似圆形的光斑。

透镜导管与微柱透镜阵列相距  $d$ ,其输入面为球面,曲率半径  $r$ ,高度  $2H \times 2H'$  ( $H, H'$  分别对应快、慢轴方向),侧面和输出面均为平面,其中输出面为边长  $2h$  的正方形,导管长  $L$ 。

## 3 理论分析

因透镜导管的入射面为球面,对各个方向光线的会聚作用均等,所以,本文选择快、慢轴两个方向进行讨论将不失一般性。

### 3.1 光线追迹

用光线追迹法进行透镜导管各参数的优化,其中坐标系的建立及所用到的参数如图 2 所示:以导管球面的球心为坐标原点, $x$  轴沿导管中轴线, $y$  轴与 LDA 快轴方向平行。LD 的 9 条线阵用  $(x_{0q}, y_{0q})$  ( $q \in [1 \sim 9]$ ) 表示,其快轴方向发散角经微柱透镜阵列压缩后  $\varphi_0 = 10^\circ$ ,透镜导管侧壁延长线与  $x$  轴交于  $o'$  点,夹角  $\alpha = \arctan[(H-h)/(\sqrt{r^2-H^2}+L-r)]$ 。某一出射角为  $\theta \in [-\varphi_0, \varphi_0]$  的光线与导管球面交于  $(x_1, y_1)$ ,入射角  $\theta'_1 = \theta + \gamma$ ,折射角  $\theta_1 = \arcsin(\sin\theta'_1/\xi)$ ,其中  $\gamma = \arcsin(y_1/r)$  为  $(x_1, y_1)$  和坐标原点(球心)连线与  $x$  轴的夹角,  $\xi = 1.52$  为透镜导管的折射率;折射光线与  $x$  轴夹角  $\beta = \theta_1 - \gamma$ ;光线由  $(x_1, y_1)$  起在导管内发生全反射,依次与导管壁交于  $(x_2, y_2) \dots (x_n, y_n) \dots$ ,入射角分别为  $\theta_2 \dots \theta_n \dots$ 。 $\varphi_n$  为光线  $(x_n, y_n), (x_{n+1}, y_{n+1})$  与  $x$  轴的夹角 ( $n = 2, 3, 4 \dots$ );  $\gamma_0 = \arctan[y_0/(r+d)]$  为  $(x_{0q}, y_{0q})$  和坐标原点连线与  $x$  轴的夹角;  $\delta = \arctan\{y_1/[h/\tan\alpha + L - r - x_1]\}$  为  $(x_1, y_1)$  和  $o'$  连线与  $x$  轴的夹角。计算中对角度的规定如下:出射角从水平线算起,逆时针旋转所成的角为正,反之为负。入射角、折射角从法线算起,逆时针旋转所成的角为正,反之为负。

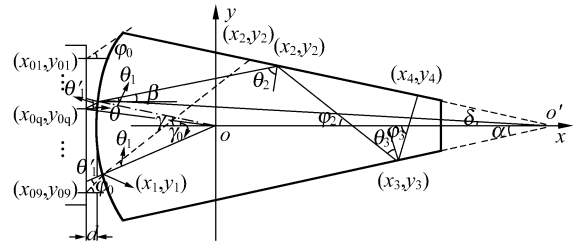


图 2 光线追迹各参数示意图

Fig. 2 Parameters of ray tracing in the lens duct

如图 2 中实线所示,

(a) 当  $\gamma_0 > 0$  时,  $y_0 > 0$ , 发光点在  $x$  轴上方。由  $(x_{0q}, y_{0q})$  以  $\theta$  角出射的光线与导管球面交于  $(x_1, y_1)$ :

$$x_1 = \frac{-p_0 \tan \theta - \sqrt{p_0^2 \tan^2 \theta - p_1 p_2}}{p_2}, \quad (1)$$

$$y_1 = y_0 + (x_1 - x_0) \tan \theta. \quad (2)$$

其中,  $p_0 = y_0 - x_0 \tan \theta$ ,  $p_1 = p_0 - r^2$ ,  $p_2 = 1 + \tan^2 \theta$ 。光线经  $(x_1, y_1)$  后与导管上壁相交还是与

下壁相交,取决于角度  $\beta$  的正负以及  $\beta$  和角度  $\delta$  的大小关系。具体讨论如下:

当  $\gamma_0 > 0$  且  $\beta > 0$  或者  $\gamma_0 > 0, \beta < 0$  且  $-\beta < \delta$  时,由  $(x_1, y_1)$  出射的光线与导管上壁相交,依据反射定律和几何关系,  $(x_2, y_2)$  可由  $(x_1, y_1)$  推算出,  $(x_3, y_3)$  可由  $(x_2, y_2)$  推算出, … 如此,得到由前一点计算后一点的通式:

$$\frac{(y_{n+1} - y_n) \times (-1)^{n+1}}{x_{n+1} - x_n} = \tan[\beta + 2(n-1)\alpha],$$

$$\frac{H - y_{n+1} \times (-1)^{n+1}}{x_{n+1} + \sqrt{r^2 - H^2}} = \tan \alpha$$

解得:

$$x_{n+1} = \frac{H - k \tan \alpha + k_1 x_n - y_n \times (-1)^{n+1}}{k_1 + \tan \alpha}, \quad (3)$$

$$y_{n+1} = (-1)^{n+1} [H - (x_{n+1} + k) \tan \alpha], \quad (4)$$

其中,  $k = \sqrt{r^2 - H^2}$ ,  $k_1 = \tan[\beta + 2(n-1)\alpha]$ ,

$n = 1, 2, 3 \dots$

当  $\gamma_0 > 0, \beta < 0$  且  $-\beta > \delta$  时,由  $(x_1, y_1)$  出射的光线与导管下壁相交。此时有:

$$\frac{(y_{n+1} - y_n) \times (-1)^n}{x_{n+1} - x_n} = \tan[-\beta + 2(n-1)\alpha],$$

$$\frac{H - y_{n+1} \times (-1)^n}{x_{n+1} + \sqrt{r^2 - H^2}} = \tan \alpha$$

解得  $x_{n+1} = \frac{H - k \tan \alpha + k_1 x_n - y_n \times (-1)^n}{k_1 + \tan \alpha}, \quad (5)$

$$y_{n+1} = (-1)^{n+1} [H - (x_{n+1} + k) \tan \alpha], \quad (6)$$

其中,  $k = \sqrt{r^2 - H^2}$ ,  $k_1 = \tan[-\beta + 2(n-1)\alpha]$ ,

$n = 1, 2, 3 \dots$

(b)  $\gamma_0 < 0$  时,  $y_0 < 0$ , 发光点在  $x$  轴下方, 分类情况与  $\gamma_0 > 0$  时类似; 当  $\gamma_0 < 0$  且  $\beta < 0$  或者  $\gamma_0 < 0, \beta > 0$  且  $\beta < -\delta$  时,由  $(x_1, y_1)$  出射的光线与导管的下壁相交,  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  的表达式与 (5)、(6) 相同; 当  $\gamma_0 < 0, \beta > 0$  且  $\beta > -\delta$  时,由  $(x_1, y_1)$  出射的光线与导管的上壁相交,  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  的表达式与 (3)、(4) 相同。  $n = 1, 2, 3 \dots$

总之,由  $LD$  出射的光线在进入透镜导管后的传播情况可以用 (3)、(4) 和 (5)、(6) 两组公式描述。并且,在全反射过程中:

$$\theta_n = \pi/2 - [\beta + 2(n-1)\alpha - \alpha], \beta > 0,$$

$$\theta_n = \pi/2 - [-\beta + 2(n-1)\alpha - \alpha], \beta < 0, \quad (7)$$

$$\varphi_n = \beta + 2(n-1)\alpha, \beta > 0,$$

$$\varphi_n = -\beta + 2(n-1)\alpha, \beta < 0. \quad (8)$$

### 3.2 透镜导管各参数的优化

3.2.1 入射球面参数  $H, H', r$  与 LDA 尺寸的关系

透镜导管入射球面由参数  $H, H', r$  确定。对导管入射球面的要求,就是将发散角为  $10^\circ$  的光束全部耦合进透镜导管。因此,如图 2 中点线所示,导管球面的最小高度应保证由  $(x_{01}, y_{01})$  以  $\theta_{\max} = \varphi_0$  向上出射的光线与导管上沿  $(-\sqrt{r^2 - H_{\min}^2}, H_{\min})$  相交。快轴方向  $(x_{01}, y_{01}) = (-r - d, 1.6)$ , 慢轴方向  $(x_{01}', y_{01}') = (-r - d, 5)$ , 则有:

$$\tan \varphi_0 = (H_{\min} - y_0) / (-\sqrt{r^2 - H_{\min}^2} - x_0), \quad (9)$$

$$\tan \varphi_0 = (H_{\min}' - y_0') / (-\sqrt{r^2 - H_{\min}'^2} - x_0'), \quad (10)$$

将 (9)、(10) 两式中的  $r$  分别表示成  $H_{\min}, H_{\min}'$  的函数,如图 3 所示。图中一个  $r$  值对应两个  $H_{\min}$  (或  $H_{\min}'$ ) 值(分别对应球面上两个交点),在耦合效果相同的情况下,从器件紧凑的角度考虑,应取较小的  $H_{\min}, H_{\min}'$  值。依据实验室激光器的具体要求,取  $r = 15$  mm, 当  $d = 0$  时,快、慢轴方向  $H_{\min}, H_{\min}'$  分别为 2.02 mm、5.16 mm,  $H, H'$  实际取值应不小于  $H_{\min}, H_{\min}'$ , 分别取为 2.5 mm、5.5 mm。

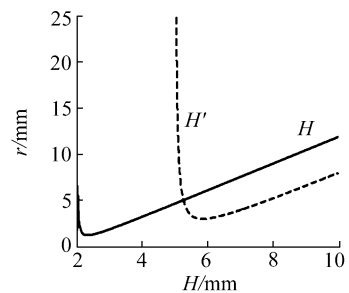


图 3  $r, H_{\min}, H_{\min}'$  的函数曲线

Fig. 3  $r$  as a function of  $H_{\min}$  and  $H_{\min}'$

3.2.2 出口端的参数  $h$  与激光介质端面尺寸的关系

透镜导管出口的尺寸须略小于激光工作介质的端面尺寸,以保证透镜导管输出的光束全部进入激光工作介质。实验室  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的端面尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 所以  $2h$  取 3 mm。

3.2.3 透镜导管的长度参数  $L$  与内全反射次数  $m$  的关系

参数优化后,所有耦合进透镜导管的光线经多次内全反射后都可以从出口端折射而出。因此,透镜导管的尺寸必须保证:①所有光线每次到

达导管侧壁时的入射角  $\theta_n \geq \omega$ , ② 光线到达出口端时与  $x$  轴的夹角  $\varphi_n < \omega$ ,  $\omega$  为导管内全反射的临界角。如图 2 中虚线所示, 由  $(x_{09}, y_{09}) = (-r, -1.6)$  以出射角  $\theta_{\max} = \varphi_0$  发出的光线传播至  $(x_2, y_2)$  时的入射角  $\theta_2$  最小, 反射次数最多。如果多次全反射后该光线可以从出口端出射, 则可保证其它光线都能从导管的出口输出。将各参数代入 (7)、(8) 两式, 得到  $\theta_n$ 、 $\varphi_n$  与  $L$ 、 $n$  的关系。实验计算了透镜导管长度  $L$  与内全反射次数  $m$  的关系, 结果如图 4 所示。可以看出, 由于透镜导管快、慢轴方向的尺寸不同, 相同长度的透镜导管内两个方向上发生全反射的次数不同。当  $L = 60$  mm、100 mm 时, 快、慢轴方向全反射次数分别为 1、3 和 1、4。

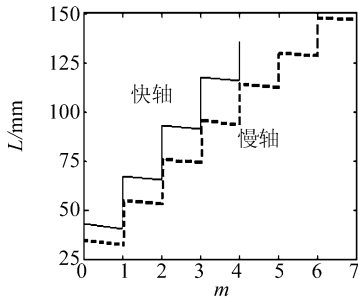


图 4  $L$ 、 $m$  的关系曲线

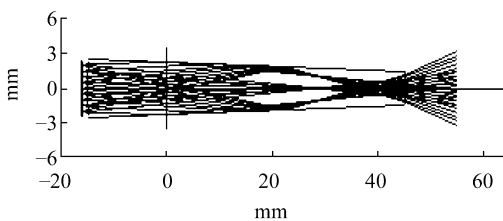
Fig. 4 Relation curve of  $L$  and  $m$

### 3.3 计算机模拟

在以上理论推导的基础上编程, 对透镜导管进行光线追迹模拟。所用参数:  $r = 15$  mm,  $H = 2.5$  mm,  $H' = 5.5$  mm,  $h = 1.5$  mm,  $L = 60$  mm。

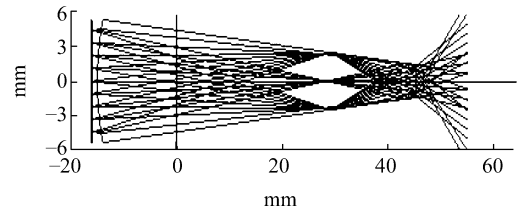
#### 3.3.1 导管内的光线分布

在每个发光点两倍发散角范围内均匀取三条光线, 模拟结果如图 5(a)~(d) 所示, (a)、(b) 和 (c)、(d) 分别为  $L = 60$  mm、100 mm 时快、慢轴方向的光线分布图。由该图及图 4 可得: 参数优化



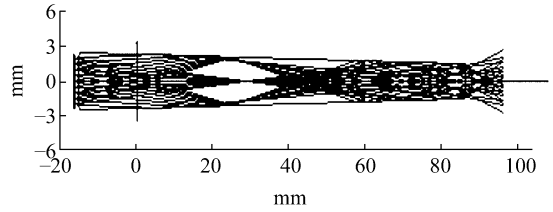
(a) 快轴

(a) Fast axis



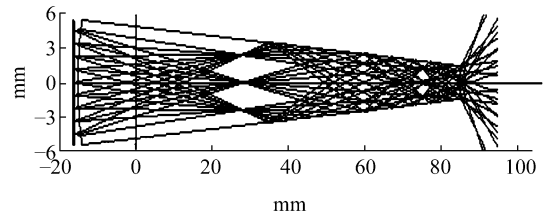
(b) 慢轴

(b) Slow axis



(c) 快轴

(c) Fast axis



(d) 慢轴

(d) Slow axis

图 5 不同长度透镜导管内的光线追迹结果

Fig. 5 Ray tracing results in lens duct of different lengths

后,  $L$  适度增大, 反射次数  $m$  增多, 但不会有光线逸出透镜导管。

#### 3.3.2 统计快轴方向的光场分布

在统计中作如下近似: (1) LD 快轴方向两倍发散角内光线均匀分布, 因出射角不同光线的光强具有高斯分布的权重。(2) 光线从透镜导管输出后, 设定统计截面和统计长度, 由统计长度内光线的条数和光线的权重给出光强的分布, 结果如图 6 所示。可见快轴方向的光强分布平滑而均匀, 光束质量良好; 光束在 1 mm 处继续会聚, 因此曲线 b 的峰值高于曲线 a; 此后, 随着距离的增大, 光斑变大, 强度变小。