

# 光纤耦合 LD 输出光场特性研究 \*

李爱云, 王晓颖

(西安工业大学 数理系, 西安 710032)

**摘 要:**根据光纤传输的模式理论, 分析了单芯光纤输出端面的光场分布. 利用单模光纤测量了纤端光场的强度分布, 拟合了光纤输出端面光强分布的近似表达式. 根据此数值计算和实验测量了多芯光纤输出端面的强度分布, 结果基本吻合. 表明光纤出射端面的光强分布应是介于高斯分布和几何分布之间的一种准高斯分布.

**关键词:**激光技术; 光纤; 光强分布; 高斯分布

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)09-1664-4

## 0 引言

近年来, 随着半导体技术的进一步发展, 激光二极管在功率、转换效率和运行寿命等方面得到了很大的提高. 其中, 激光二极管泵浦的固体激光器具有激光二极管和固体激光器的双重优点, 在各个领域都获得了广泛的应用. 特别是端面泵浦方式中的光纤耦合系统在目前被普遍采用, 这种耦合方式是将 LD 阵列输出的光先耦合进光纤, 然后经光纤输出, 泵浦时再经组合透镜对该光束进行耦合, 获得空间轴对称分布的泵浦光<sup>[1-2]</sup>. 但是光纤端面出射的光场没有完整准确的理论解析解, 因此在设计耦合系统时大多是凭实际经验来操作. 本文根据光纤传输的模式理论, 利用拟合方法对光纤输出端的光场分布进行了数值分析和实验测量. 结果表明, 光纤出射端面的光强分布为准高斯分布.

## 1 光纤纤端的输出光场

按照光纤的模式理论, 多模光纤中传输的光存在多个模式, 在光纤传输中光功率按模式分布, 各个模式所携带的能量随着光纤的长度而变化. 到达平衡长度后大部分光功率集中分布在基模及低阶模附近, 此时光纤端面输出光场具有稳定的强度分布<sup>[3-4]</sup>. 在光纤出射端面, 光强应是沿径向均匀分布的平面波和沿径向高斯分布的高斯光束两部分构成; 相应的纤端出射的光场强度应是由准平面波场的圆孔衍射场和在自由空间中传输的准高斯光束叠加而成. 对于多模光纤, 由于光纤芯径比较大, 衍射效应基本被平均化了, 纤端出射光场可近似为某种准高斯光束. 由高斯光束半宽度有<sup>[5]</sup>

$$w^2(z) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

为把光束半宽度  $w(z)$  与光纤纤芯半径  $a_0$  联系起来, 令  $w_0 = \sigma a_0$ , 对于渐变折射率分布光纤和突变折射率光纤可分别选取  $\sigma$  为  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  和  $1^{[3]}$ . 可得

$$w^2(z) = \sigma^2 a_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \sigma^2 a_0^2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

设  $\theta$  为光纤最大出射角, 则依据几何光学应有

$$w_2(z) = a_0 \left[ 1 + \frac{z}{a_0} \tan \theta \right] \quad (3)$$

考虑实际中光纤纤端的光场强度比较复杂, 纤端的光场既不会是单纯的高斯光束, 也不会单纯是均匀的几何光束, 为了得到纤端光场与实际情况尽可能相符合的分布, 结合以上两种情况, 引入无量纲的调和参量  $\xi, \eta$ , 修正结果如下

$$w_3(z) = \sigma a_0 \left[ 1 + \xi \left( \frac{z}{\sigma a_0} \right)^\eta \tan \theta \right] \quad (4)$$

依据式(4)可以给出光纤纤端光场强度的近似分布

$$I(r, z) = \frac{I_0}{w_3^2(z)} \exp \left\{ - \frac{2r^2}{w_3^2(z)} \right\} \quad (5)$$

式中  $\sigma a_0 = w_0$ ,  $a_0$  为纤芯半径,  $\theta$  为光纤的最大出射角, 调和参量  $\xi, \eta$  在实际使用过程中可通过实验测量给出.

## 2 实验测量和拟合

为了准确拟合出参量  $\xi, \eta$ , 对测量的几组不同  $r, z$  处的光强值  $I_i'(r, z)$ , 用最小二乘法进行拟合. 为此定义拟合优度

$$\chi^2 = \sum [I_i'(r, z) - I_i(r, z)]^2 \quad (6)$$

针对具体的光纤耦合 LD 器件, 当  $\chi^2$  取最小值时, 拟合出的调和参量  $\eta, \xi$  对应的实验测量值与式(5)给出的理论计算值偏差最小, 则所得到的表达式即为该 LD 输出光场的最佳表示.

\*陕西省教育厅专项科研计划项目(07JK276)资助  
Tel: 029-85391069 Email: liaiyun\_2003@hotmail.com  
收稿日期: 2007-05-20

为了准确获取不同  $(r, z)$  点的光场强度,采用另一根单模光纤对待测量的光纤耦合 LD 的纤端输出横向光场强度分布进行测量. 实验时首先用循环冷却系统保持光纤耦合 LD 工作在最佳温度下,固定 LD 工作电流为 8 A,调整光纤输出固定端,使光纤输出端水平. 单模光纤接收端固定在二维水平可移动支架上,另一端接功率计,通过横向移动接收光纤逐点测出距离发射光纤端面不同距离处(到光纤端面的距离分别为  $z = 8\text{ mm}$ ,  $z = 9\text{ mm}$ ,  $z = 10\text{ mm}$ )横

向截面上各点的功率. 考虑实验所用光纤为突变折射率光纤,取  $\sigma = 1$ ,所用器件参量为  $a_0 = 0.3\text{ mm}$ ,  $\text{NA} = 0.22$ ,故  $\theta_0 = \arcsin(\text{NA}) = 0.2218$

根据式(6),编写程序计算得到  $\chi^2$  最小时  $\eta, \xi$  的值为  $\eta = 1.945$ ,  $\xi = 0.0178$ ,此时对应的  $\chi^2 = 0.1384$

把拟合出的  $\eta, \xi$  值代入式(5),计算  $z = 8\text{ mm}$  处截面上对应点的光强值,计算结果如图 1(a),实验测量该处的光强分布如图 1(b),该处一维实验点和拟合光强分布结果如图 1(c).

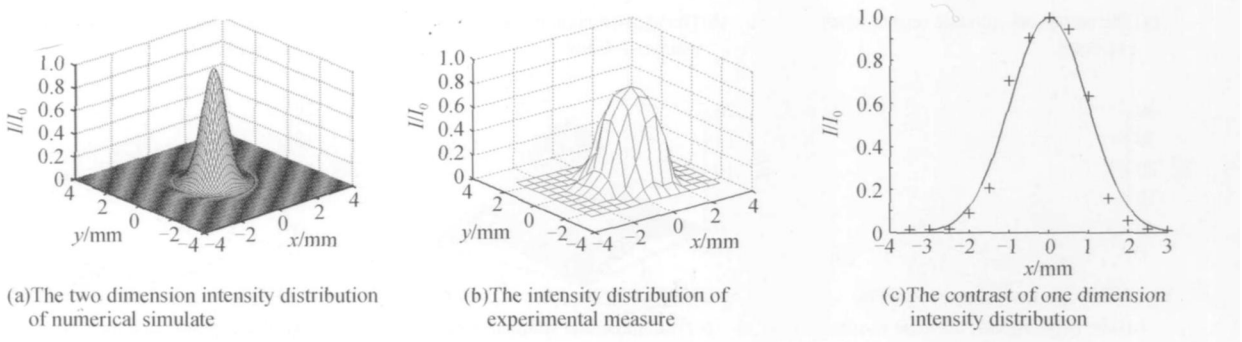


图 1 单芯光纤强度的数值计算和实验测量结果

Fig. 1 The results of numerical simulate and experimental measure of single fiber

由图 1 可见,采用最小二乘法得到的拟合结果比较理想,而根据拟合出的光强二维分布图与实际测出的光强二维分布图比较,虽然在强度值和强度分布方面基本都能达到吻合,但在峰值附近二者还是有一定的差距,此主要应由于实验测量截面上的光强分布时测量点间隔取的太大(0.5 mm),获得的数据量较少的原因.

### 3 多芯光纤输出光场的强度分布

对于多芯光纤,由于各光纤可以认为是不相干的,因而在计算多芯光纤输出光强时,可直接将多束光强进行几何叠加. 参照光纤布局图,如图 2,可

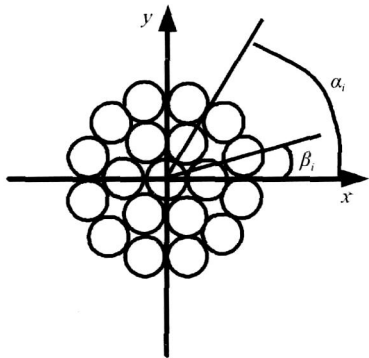


图 2 多芯光纤布局图

Fig. 2 The diagram of fiber bundle distribution

得到合成表示式

$$I(x, y, z) = I_1(x, y, z) + \sum_{i=0}^5 I_{2i}(x, y, z) + \sum_{i=0}^{11} I_{3i}(x, y, z)$$

式中,中心的单根光纤输出光强分布为

$$I(x, y, z) = \frac{I_0}{w^2(z)} \exp \left\{ -2 \frac{(x^2 + y^2)}{w^2(z)} \right\} \quad (7)$$

中心光纤外的 18 根光纤输出光强分布分别为<sup>[6-7]</sup>

$$I_{2i}(x, y, z) = I_{3i}(x, y, z) = \frac{I_0}{w^2(z)} \cdot \exp \left\{ -2 \frac{(x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2}{w^2(z)} \right\} \quad (8)$$

式(8)中  $I_{2i}(x, y, z)$  为第二层紧邻中心光纤的 6 根光纤分别输出光强分布,其各光纤的中心坐标分别

为  $x_{0i} = 2a \cos \alpha$ ,  $y_{0i} = 2a \sin \alpha$ ,  $\alpha = i \frac{\pi}{3}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

5.  $I_{3i}(x, y, z)$  为最外面的 12 根光纤分别的输出光强分布,其各光纤的中心坐标分别为  $x_{0i} = (2 + \sqrt{3})a \cdot \cos \beta$ ,  $y_{0i} = (2 + \sqrt{3})a \sin \beta$ ,  $\beta = i \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{12}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 11$ .

$$\text{式(7)、(8)中, } w(z) = \sigma_{a0} \left[ 1 + \left\{ \frac{z}{\sigma_{a0}} \right\}^\eta \tan \theta \right]$$

为  $z$  处的光束半径.

$$I(x, y, z) = I_1(x, y, z) + \sum_{i=0}^5 I_{2i}(x, y, z) + \sum_{i=0}^{11} I_{3i}(x, y, z)$$

式中各参量值同单芯光纤实验参量,芯径为 0.22 mm;为方便起见取  $I_0$  为 1. 将上述参量值代入式(8),可得到数值计算的光强分布图.

为了与模拟计算结果对照,实验仍然按逐行扫

描的方法,即采用相同的单模光纤分别测量距离多芯光纤端面不同距离处截面上各点的光强度分布,得到对应的多芯光纤纤端光场各点强度值. 图 3 为

根据前述拟合出的光束半径传输表达式,数值计算结果和实验测量结果的对照图.

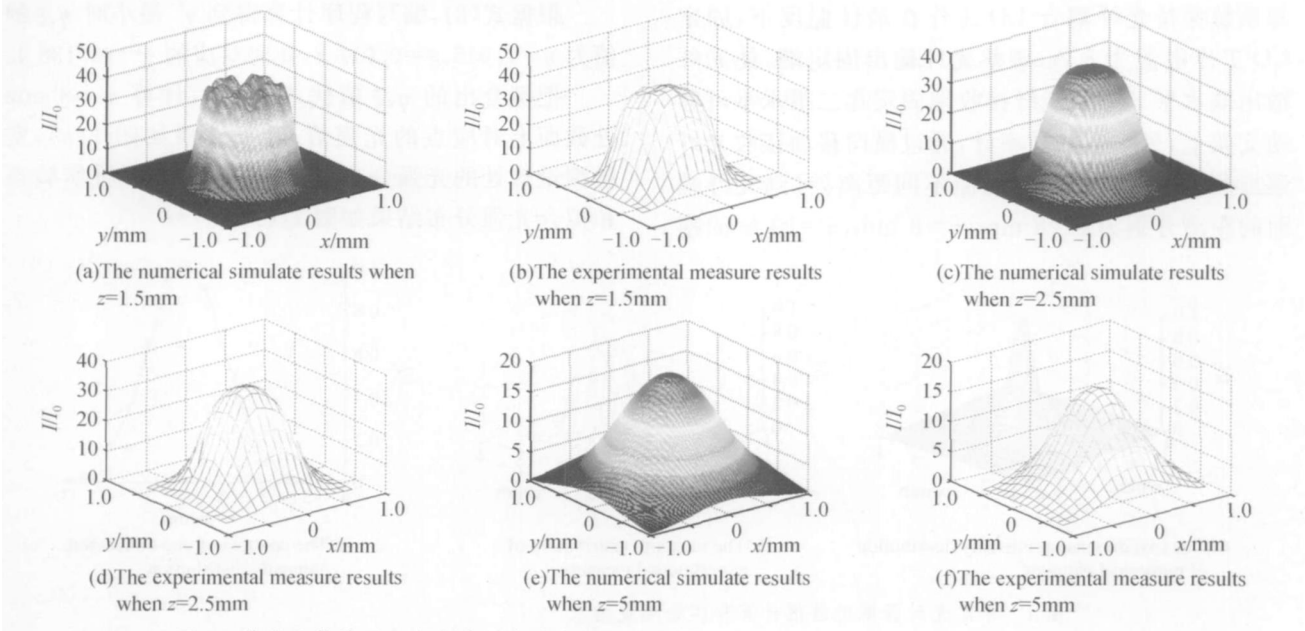


图 3 数值计算结果和实验结果的对比图  
Fig. 3 The results contrast of numerical simulate and experimental measure of fiber bundle

由图 3 可以看出,按照所述的理论模型进行数值计算的结果与实验的结果吻合得比较好,表明使用该理论模型能比较准确的描述光纤端面的光场分布. 从图中还可看出,随  $z$  的增大,光纤束由相互独立到逐渐融合,直到成为一个较好的平滑的准高斯分布. 但在峰值附近仍略微存在一定的误差,初步分析该原因应主要在于实验测量时虽增加了实验点的取样间隔(0.1 mm),测量点的间隔仍然较大所造成.

4 结论

在设计二极管泵浦固体激光器时,必须考虑选择适当的耦合系统,以便把发散角大的泵浦光束转换成光束截面小、发散角小的泵浦光,以使泵浦光最大限度的耦合进增益介质,以求得泵浦光与谐振腔模空间最大程度的交叠,从而得到高功率和高光束质量的激光输出. 本文针对长春理工大学研制的 30 W 光纤耦合 LD,对纤端输出光场的强度分布进行了实验测量,并根据光纤的参量拟合出了其强度解析表达式,此结果对光纤输出光束泵浦固体激光器时的耦合系统进行优化设计具有积极意义.

参考文献

[1] LIN Bin, WANG Ke, GUO Fuyuan. Beam parameter in diffracted field of fiber end face and the measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3) : 294-295.

林斌,王科,郭福源. 光纤端面衍射场光束参数及测量[J]. *光子学报*, 2004, 33(3) : 294-298.

[2] SUN Yur-ming, HOU Xue-yuan, LI Yur-fei. LD-pumped A-Q Q-switched Nd : GdVO<sub>4</sub> laser with high repetition rates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6) : 645-647.

孙渝明,候学元,李宇飞. LD 泵浦的声光调 Q 高重复率 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *光子学报*, 2004, 33(6) : 645-647.

[3] YUAN Li-bo. Light source and the optical field formed by an optical fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 1994, 18(1) : 54-64.

苑立波. 光源与纤端光场[J]. *光通信技术*, 1994, 18(1) : 54-64.

[4] QI Xiao-ling, WANG Fur-juan, CAI Zhi-gang, et al. Intensity distribution of transmitted beam of multimode optical fiber[J]. *Simiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(2) : 117-120.

齐晓玲,王福娟,蔡志刚,等. 多模光纤出射光束光强分布的研究[J]. *半导体光电*, 2003, 24(2) : 117-120.

[5] ZHOU Bing-kun, Gao Yr-zhi, CHEN Jia-hua, et al. Laser theory[M]. 4th ed. Beijing : National Defence Industry press, 2001 : 74-78.

周丙琨,高以智,陈家骅,等. *激光原理* [M]. 第 4 版. 北京 : 国防工业出版社, 2001 : 74-78.

[6] PALMA C. Decentered Gaussian beams, ray bundles, and Bessel-Gaussian beams [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(6) : 1116-1120.

[7] AL-RASHED A R, SALEH B E A. Decentered gaussian beams [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30) : 6819-6825.

Study on Optical Properties of Fiber Bundle Coupling LD Output Beams

LI Ai-yun ,WANG Xiao-ying

(Department of Maths & Physics ,Xi 'an Technological University ,Xi 'an 710032 ,China)

Received date :2007-05-20

**Abstract :** The intensity distribution of fiber bundle coupling LD output beams is discussed. The optical field distribution of output end of fiber is analyzed based on the mode theory of the fiber transmit. The optical field distribution of output end of fiber is measured and numerically simulated ,and the approximate expression is given. The intensity distribution of fiber bundle coupling LD output beams is numerically simulated and experimentally studied. The simulation results agreed well with the experimental ones. The results shows the intensity distribution of output end of fiber is a semi Gaussian distribute middle in Gaussian distribution and geometrical distribution.

**Key words :** Laser technique ;Fiber ;Intensity distribution ; Gaussian distribution



**LI Ai-yun** was born in 1954. She graduated from Shaanxi Normal University. Now she is an associate professor at Department of Mathematic & Physics ,Xi 'an Technological University. And her major reseach fields include optical holography and optical information processing.